

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Systém low-power napájení přenosného zařízení se záznamem dat

Low-power Supply System for Portable Device with Data Logging

Ostrava 2017

Bc. Karolína Janošová

Zadání

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Karolína Janošová**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901T009 Biomedicínské inženýrství
Téma: **Systém low-power napájení přenosného zařízení se záznamem dat**
Low-power Supply System for Portable Device with Data Logging
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis technologií pro konstrukci zařízení (MCU, paměti, komunikační rozhraní, analog atd.).
2. Popis možností napájecích zdrojů využívající dobíjecí baterie.
3. Rešerše metod a strategií low-power napájení.
4. Návrh vlastního řešení funkčního vzorku zařízení (zdrojová a logovací část).
5. Konstrukce hardwarového konceptu pomocí vývojových kitů, včetně "gas gauge" obvodu.
6. Návrh a implementace low-power měřicího cyklu včetně I2C komunikace.
7. Testování řešení z hlediska spotřeby a spolehlivosti.
8. Zhodnocení vlastního řešení a závěr práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RABAEY, Jan. *Low power design essentials*. Online-Ausg. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0387717135.
- [2] SHEARER, Findlay (ed.). *Power management in mobile devices*. Burlington, MA: Newnes, c2008. Communications engineering series. ISBN 978-0-7506-7958-9. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7506-7958-9.00012-5>.
- [3] PRAUZEK, M., A. G. WATTS, P. MUSILEK, L. WYARD-SCOTT and J. KOZIOREK. Simulation of adaptive duty cycling in solar powered environmental monitoring systems. In: *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE CCECE 2014. Print ISSN 0840-7789. DOI: 10.1109/CCECE.2014.6901008.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



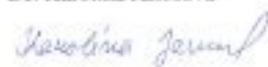
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpala informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Ostravě dne 28. 4. 2017

Bc. Karolína Janošová



Poděkování

Děkuji Ing. Michalu Prauzkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky a dobré rady při tvorbě diplomové práce. Poděkování patří také Ing. Martinu Stankušovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost při konzultacích a vypracovávání diplomové práce. Dále děkuji rodině, za pochopení a podporu při studiu.

Abstrakt

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce se zabývá technologiemi pro konstrukci zařízení (mikrokontrolér, paměti, typy komunikací, periferie). Další náplní je popis možností napájecích zdrojů, které využívají dobíjecí baterie. V tomto úseku jsou porovnány vybrané typy baterií, z nichž jeden typ byl vybrán pro praktickou část práce. Třetím bodem teoretické části je rešerše metod a strategií low-power napájení. Součástí rešerše je průzkum trhu týkající se tohoto typu napájení. Praktická část práce se věnuje realizaci měřicího řetězce. Součástí je návrh vlastního řešení funkčního vzorku zařízení a jeho následná konstrukce. V poslední části je provedeno zprostředkování komunikace mezi jednotlivými částmi měřicího řetězce, na což navazuje vytvoření měřicích cyklů a testování.

Klíčová slova

MCU, dobíjecí baterie, akumulátor, low-power napájení

Abstract

The thesis is divided into the theoretical and practical part. The theoretical part deals with technologies for device construction (microcontroller, memory, types of communications, peripherals). Another content is a description of the power supply options that use rechargeable batteries. This section compares selected battery types. One battery type was selected for the practical part of the work. The third point of the theoretical part is the research. Research includes looking for methods and strategies of low-power supply. Part of the research is market survey on this type of power supply. The practical part solves the realization of the measuring chain. The design of a solution to the functional sample is included. After that, the design is being implemented. Communication is mediated between the individual parts of the measuring chain. The measurement cycles are created and testing.

Key Words

MCU, rechargeable battery, accumulator, low-power supply

Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	10
Seznam grafů	11
1 Úvod	12
2 Popis technologií pro konstrukci zařízení	13
2.1 Mikrokontrolér (MCU – MicroController Unit)	13
2.2 Operační paměť	14
2.2.1 Volatilní paměť a dynamická paměť	14
2.3 Elektronická paměť	14
2.4 Sběrnice (bus) neboli bus system	15
2.5 Komunikace	16
2.6 USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter)	16
2.7 SPI (Serial Peripheral Interface)	17
2.8 RS232	18
2.9 I ² C	19
2.10 Periferie	20
2.10.1 Čítač (Counter) a časovač (Timer)	20
2.10.2 PWM generátor	20
2.10.3 A/D a D/A převodníky	21
3 Popis možností napájecích zdrojů využívající dobíjecí baterie	22
3.1 Zdroje energie	22
3.1.1 Primární články	22
3.1.2 Sekundární články	22
3.2 Akumulátor (sekundární galvanický článek)	22
4 Rešerše metod a strategií low-power napájení	26
4.1 Sledování bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracking MPPT)	27
4.2 Dynamické přepínání energie (Dynamic Power Switching – DPS)	27
4.3 Střída	27
4.4 Dynamické napěťové škálování a dynamické frekvenční škálování (DVFS)	28
5 Návrh a konstrukce vlastního řešení funkčního vzorku zařízení	29
5.1 FRDM-KL25Z	29

5.2	FRDM-FXS-MULT2-B	30
5.3	Gas Gauge	31
5.4	Baterie	32
5.5	Převodník TTL↔RS232	32
5.6	J-Link	33
5.7	Úprava měřicího řetězce.....	35
5.8	Softwarová realizace	39
6	Návrh a implementace low-power měřicího cyklu včetně I ² C komunikace.	41
6.1	Návrh low-power měřicího cyklu.....	41
6.1.1	Konkrétní návrhy pro řešení low-power.....	43
6.2	Testování řešení z hlediska spotřeby a spolehlivosti.....	44
6.2.1	Test spotřeby	44
6.2.2	Testování z hlediska spolehlivosti.....	45
7	Závěr	54
8	Použité zdroje.....	55

Seznam použitých zkratk

ACK – Acknowledge (bit pro potvrzení přenosu informace)
ARM – Acorn RISC machine (architektura mikroprocesoru s nízkou spotřebou elektrické energie)
CLK – Clock (hodiny, hodinový signál)
CTS – Clear to send (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
DCD – Data carrier detect (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
DFS – Dynamic frequency scaling (Dynamické frekvenční škálování)
DSR – Data set ready (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
DVFS – Dynamic frequency and voltage scaling (Dynamické škálování frekvence a napětí)
DVS – Dynamic voltage scaling (Dynamické napěťové škálování)
EMS – Enviromental monitoring systems (systém pro monitorování životního prostředí)
GND – Common ground (ochranné uzemnění)
I²C – Inter-intergrated communication (multimasterová synchronní poloduplexní komunikace)
LSB – Least significant bite (nejméně významný bit)
MCU – Microcontroller (mikrokontrolér)
MPPT – Maximum power point tracking (Sledování bodu maximálního výkonu)
MSB – Most significant bite (nejvíce významný bit)
PWM – Pulsně šířková modulace
RI – Ring indicator (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
RISC – Reduced Instruction Set Computing (architektura s redukovanou instrukční sadou)
RS232 – Serial port (sériové rozhraní)
RTS – Request to send (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
RxD – Received data (přijímací vodič rozhraní komunikace)
SCL – Serial clock (sériový hodinový signál)
SDA – Serial data line (sériová datová linka)
SPI – Serial Peripheral interface (sériové periferní rozhraní)
TR – Data Terminal ready (vodič pro řízení přenosu dat u RS232)
TTL – Transistor-transistor-logic (tranzistorově-tranzistorová logika)
TxD – Transmitted data (přijímací vodič rozhraní komunikace)
UART – Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter (synchronně/ asynchronní sériové rozhraní)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vnitřní struktura mikrokontroléru [1]	13
Obrázek 2: UART, častá struktura typu datové komunikace [25]	17
Obrázek 3: SPI komunikace, jeden "master" a jeden "slave" [7] [2]	18
Obrázek 4: SPI komunikace, jeden "master" a více "slave" členů [7] [2]	18
Obrázek 5: I ² C struktura komunikace, jeden "master" a tři "slave". [8]	19
Obrázek 6: Časový diagram a struktura posílaných dat I ² C komunikace. [12]	20
Obrázek 7: Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion (pro jednotlivé typy) [26]	24
Obrázek 8: Průběh napětí a proudu při nabíjení akumulátoru Li-ion [26]	25
Obrázek 9: Li-ion baterie 6SP652535použitá v měřicím řetězci [23]	25
Obrázek 10: Blokové schéma zapojení navrženého měřicího řetězce	29
Obrázek 11: Vývojová platforma FRDM KL25Z [14]	30
Obrázek 12: Rozšiřující vývojová platforma FRDM-FXS-MULT2B [13]	30
Obrázek 13: Typické zapojení obvodu Gas Gauge [11]	31
Obrázek 14: Monitorovací obvod baterie "Gas Gauge" LTC2942 [11]	31
Obrázek 15: Převodník TTL-RS232	33
Obrázek 16: Ladicí sonda J-Link EDU [24]	33
Obrázek 17: Propojení mikrokontroléru FRDM-KL25Z a multisenzorové desky FRDM-FXS-MULT2-B I/O piny	34
Obrázek 18: Měřicí řetězec zapojený z částí popsaných výše	34
Obrázek 19: Artefakt v měřicím řetězci na nabíjecí větvi	35
Obrázek 20: Realizovaný filtr s napětíovými sledovači	36
Obrázek 21: Artefakt po průchodu filtrem (zelená křivka) a ostatní křivky naměřené v jednotlivých bodech filtru	36
Obrázek 22: Grafické znázornění dobití baterie po zapojení filtru do měřicího řetězce	37
Obrázek 23: Artefakt vzniklý při přechodu napájení z USB na napájení z baterie	38
Obrázek 24: Vyřešený artefakt v napájecí větvi po odpájení kondenzátoru z devkitu	39
Obrázek 25 Diagram komunikace mezi mikrokontrolérem a monitorovacím obvodem baterie pro získání dat	42
Obrázek 26: Diagram komunikace mezi mikrokontrolérem a akcelerometrem pro získání dat	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: Typy Li-ion akumulátorů [26]	24
Tabulka 2: Přehled vlastností akumulátorových baterií [5] [9] [10]	25
Tabulka 3: Techniky řízení energie [28] [20] [5]	27
Tabulka 4: Mapa registrů Gas Gauge obvodu LTC2942 [11]	32
Tabulka 5: Zvolené symbolické proměnné pro frekvenci	46
Tabulka 6: Výběr vzorkovací frekvence pro měřicí cyklus dle aktuální hodnoty napětí baterie	47
Tabulka 7: Výběr vzorkovací frekvence pro měřicí cyklus dle napětí baterie	48
Tabulka 8: Pro měření tohoto testu byl nastaven měřicí cyklus frekvence dle hodnoty nabití baterie .	49

Seznam grafů

Graf 1: Naměřená průměrná spotřeba výsledného měřicího řetězce (s vypnutým Bluetooth, frekvencí mikrokontroléru 8 MHz, odpojeným OpenSDA).....	45
Graf 2: Napětí baterie v průběhu Testu 1. se zapojením měřicího řetězce bez úprav (data posílána pouze při změně).....	46
Graf 3: Napětí baterie v průběhu Testu 2. s vypnutými diodami (data posílána pouze při změně)	47
Graf 4: Napětí baterie v průběhu Testu 3. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz	47
Graf 5: Napětí baterie v průběhu Testu 4. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz	48
Graf 6: Napětí baterie v průběhu Testu 5. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz a $F_{vz}=100$ Hz.....	49
Graf 7: Napětí baterie v průběhu Testu 6. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz a $F_{vz}=100$ Hz.....	50
Graf 8: Napětí baterie v průběhu Testu 7. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=6,25$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz.....	50
Graf 9: Napětí baterie v průběhu Testu 8. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=50$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz a odpojeným OpenSDA.....	51
Graf 10: Napětí baterie v průběhu Testu 9. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=200$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, frekvencí mikrokontroléru 8 MHz a odpojeným OpenSDA	51
Graf 11: Napětí baterie v průběhu Testu 10. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=1,56$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz.....	52
Graf 12: Napětí baterie v průběhu Testu 11. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=12,50$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz	52
Graf 13: Napětí baterie při nabíjecím cyklu	53

1 Úvod

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce se zabývá technologiemi pro konstrukci zařízení. Cílem práce je navrhnout a konstruovat funkční vzorek zařízení. Tento vzorek by měl pracovat v low-power režimu. Pomocí tohoto měřicího řetězce jsou realizovány měřicí cykly, podpořené referenčním měřením pro ověření správnosti. Pomocí těchto úkolů bude docíleno co nejlepšího nastavení režimu sběru, ukládání, úspory a využívání energie.

Zařízení neboli měřicí vzorek, se skládá z mikrokontroléru, sběrnice, periférií, paměti elektronické a operační. Sběrnice slouží k propojení jednotlivých funkčních částí a sběru informací. Periferie zahrnují kupříkladu časovače, čítače a PWM modulátory. Součástí jsou nepostradatelné komunikační rozhraní, např. SPI, UART, RS232 či I²C. Další náplní je popis možností napájecích zdrojů. Napájecí zdroje mohou být dvojího typu, primární a sekundární. Primární články se po vybití již znovu nedají nabít. Opakem jsou sekundární, které se opakovaně dobíjejí. V tomto úseku jsou porovnány vybrané typy baterií, z nichž jeden typ je vybrán pro praktickou část práce. Třetím bodem teoretické části je rešerše metod a strategií low-power napájení. Zde je řešeno řízení spotřeby elektrické energie. Součástí rešerše je průzkum trhu týkající se tohoto typu napájení a následné vyhodnocení. Řízení může být aplikováno na třech úrovních: mikrokontrolér, uzel a síť. V rešerši jsou uvedeny metody, mezi které řadíme dynamické škálování napětí a frekvence, metoda střídání, a další.

Součástí práce je návrh vlastního řešení funkčního vzorku zařízení a následná konstrukce návrhu. Funkční vzorek, tedy měřicí řetězec, se skládá z mikrokontroléru, rozšiřující multisenzorové desky, převodníku logických úrovní TTL/RS232, baterie a Gas Gauge monitorovacího obvodu baterie. Tyto součásti budou vybrány dle potřeb práce. Po zapojení měřicího řetězce je provedeno zprostředkování komunikace mezi jeho jednotlivými částmi. Dále také vytvoření měřicích cyklů s ukládáním naměřených dat. Ukládání probíhá přes sériovou linku nebo vizualizací testů přes ladící sondu J-Link. Poslední částí práce je testování a vyhodnocení naměřených výsledků z hlediska spotřeby a spolehlivosti. V závěru práce je zhodnocením vlastních výsledků.

2 Popis technologií pro konstrukci zařízení

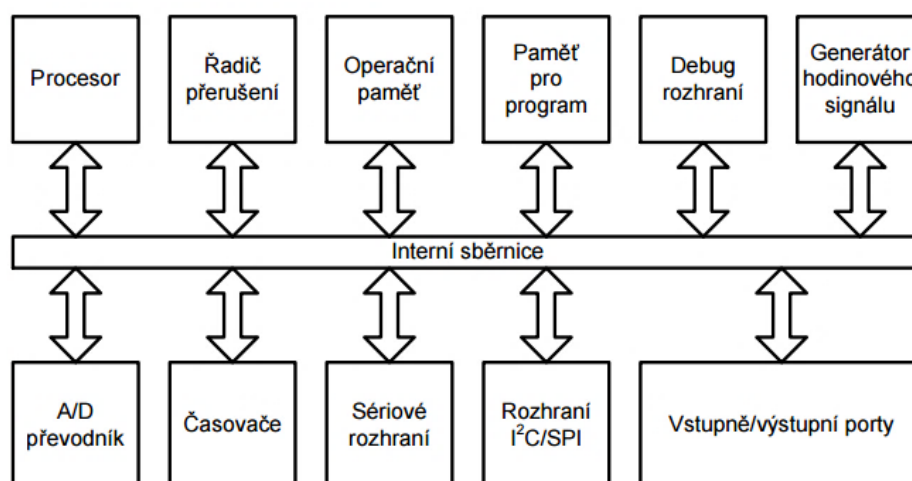
2.1 Mikrokontrolér (MCU – MicroController Unit)

Mikrokontrolér také zvaný jednočipový počítač nebo malý počítač. Jde o samostatný integrovaný obvod. Obsahuje procesor, operační paměť, paměť programu, generátor hodinového signálu a vstupně/výstupní obvody a piny. Dále jsou v mikrokontroléru obsaženy základní periferie sloužící ke komunikaci s okolím.

Procesor, jádro mikroprocesoru (centrální mikroprocesorová jednotka), může obsahovat jednodušší 4bitové mikroprocesory, až po složitější a komplexnější 32 až 64bitové. Paměť programu obsažená v čipu bývá programovatelná, lze na ni uložit program. Příkladem může být ROM, EEPROM. Další paměť je paměť operační, př. RAM. Vstupně-výstupní obvody slouží pro ovládání a detekci logických stavů na jednotlivých pinech. Vstupně-výstupní rozhraní nabízí a zprostředkovává komunikaci s okolím. Lze zde nalézt paralelní porty, sériové porty či porty komunikačních sběrnic (bus). Liší se různou složitostí a počtem pinů [1] [3] .

Nepostradatelná je sériová vstupně-výstupní komunikace, realizovaná např. UART (synchronně/asynchronní rozhraní). Dále může být sériová komunikace reprezentována dalšími rozhraními, jako je SPI (sériové periferní rozhraní) a I²C. Toto slouží pro systémové propojení s perifériemi, kterými mohou být třeba časovače, čítače, řadiče (přerušeni, displeje, klávesnice atd.), oscilátor (RC nebo krystal), A/D a D/A převodníky, PWM generátor (pro pulsně-šířkovou modulaci), programovatelné hradlové pole a další. Dalšími součástmi je generátor hodin, analogově-digitální převodníky, někdy i převodníky opačné, podpora pro programování a ladění [1] [3] [7] .

Periferie jsou další součástí mikrokontroléru. Nepatří do základní struktury, dalo by se říci, že se jedná o jakousi nadstavbu neboli rozšíření. Periferie může obsahovat komunikační rozhraní (UART, I²C apod.), čítače, časovače, generátory pulsně šířkové modulace (PWM), A/D a D/A převodníky, řadiče (př. klávesnice nebo displeje), rozhraní pro ladění programu či nonvolatilní paměť pro data. Jednotlivé části mikrokontroléru jsou napojeny na interní sběrnici, která zprostředkovává vzájemnou komunikaci [1] [7] .



Obrázek 1: Vnitřní struktura mikrokontroléru[1]

Mikrokontroléry se dělí na jednotlivé rodiny, a to buď dle architektury, nebo sféry aplikace. Podle architektury např. 8bitové, 16bitové či 32bitové (PowerPC, ARM apod.), DSC (Digital Signal

Controllers), apod. Dále se architektury dělí na řady a další řady se ještě mohou členit. Jednotlivé typy z řady mají různá provedení, lišící se v periférii a mechanickém provedení pouzdra. Výběr mikrokontroléru závisí na individuálních požadavcích jednotlivých prací. Při nekompatibilitě hardwaru a později vytvořeného softwaru mohou nastat problémy:

- „Nedostatek operační paměti nebo nedostatek paměti pro program.
- Špatné volby pouzdra mikrokontroléru nebo počtu periférií.
- Nevhodné volby periférií pro daný program.
- Nedostatečný výpočetní výkon (poddimezovaný výkon).
- Špatné parametry z hlediska spotřeby zařízení (předimezovaný výkon).
- Nekompatibilita komunikačních rozhraní [1].“

Každý mikrokontrolér má specifické technické složení, které zpravidla nelze zaměnit s jiným typem. Mikrokontrolér má poměrně velkou spolehlivost a kompaktnost. Používají se pro jednoúčelové aplikace, např. při řízení, regulaci nebo jsou vyrobeny především pro použití do vestavěných systémů. Na rozdíl od mikroprocesorů používaných v osobních počítačích, jsou složeny z většího množství samostatných čipů. Mikrokontroléry se používají v automaticky řízených produktech a zařízeních. Řadíme zde průmysl automobilový, medicínský, dálkové ovladače, kancelářské stroje, elektrické nářadí a mnoho dalších. Jsou výhodnější v porovnání s výrobky, které používají součásti obsažené v mikrokontroléru samostatně (tedy nezabudované v jednom čipu), protože se s vývojem zmenšuje velikost i cena mikrokontroléru [1] [2] [7] [3].

2.2 Operační paměť

Jedná se o vnitřní paměť číslicového počítače, je volatilní (tedy nestálá a energeticky závislá), bývá typu RWM a RAM. Operační paměť je adresována mikroprocesorem a spravována vybranou částí operačního systému. K paměti je rychlý a náhodný přístup. Umožňuje čtení a zápis dat. Tato paměť slouží pro dočasné uložení zpracovávaných dat, dílčích výsledků, stavů jednotlivých procesů, základní datové struktury jádra a kódy programů, a jejich následné spuštění. K operační paměti je rychlejší přístup než k paměti vnější. Pro přístup do paměti se používá procesor, který použije adresu, k vybrání požadované buňky k operaci. Jednotlivé číselné hodnoty a adresy jsou kódovány (př. binárně či hexadecimálně). Spojení paměti s procesorem je realizováno pomocí sběrnice. V současné době bývá v počítačích polovodičová paměť typu RAM. Tato paměť je volatilní a dynamická, zj. kvůli nižším nákladům [1] [2] [7].

2.2.1 Volatilní paměť a dynamická paměť

Volatilní paměť ztrácí informaci při odpojení napájení. Naopak paměť dynamická uchovává informaci pomocí kondenzátoru, v němž je elektrický náboj. Má ovšem sklon se vybíjet i v době připojení k napájení, proto je nutné provádět „refresh“. „Refresh“ znamená periodickou obnovu informace uložené v buňce. Tento úkol plní jeden z obvodů čipu [1] [2].

2.3 Elektronická paměť

Elektronická paměť slouží k uložení informace a následnému čtení z této paměti. Informace v paměti je uchovávána po určitou dobu a lze ji znovu získat pro další užití. Existuje více typů paměti. V mikrokontroléru slouží paměť pro ukládání dat. Tyto paměti dělíme podle zápisu a čtení, podle přístupu a podle energetické závislosti [1] [2].

Dle zápisu a čtení dělíme:

- Jen pro čtení (ROM) – informace jsou do této paměti uloženy při výrobě a už je nelze změnit. Čtení informací nemá žádná omezení.
- Pro čtení a zápis (RWM) – data mohou být do této paměti zapisována i čtena. Není třeba žádných specifických postupů, jako u programovatelných pamětí.
- Programovatelné (PROM, EPROM, EEPROM) – data se do této paměti zapisují speciálním způsobem dle typu programovatelné paměti. V klasickém režimu slouží jen pro čtení dat. Například EPROM paměť je mazána pomocí ultrafialového světla. Paměť typu EEPROM je mazána elektricky. Tyto paměti mají omezený počet cyklů pro programování [1] [2] .

Dle přístupu dělíme:

- S náhodným přístupem (RAM) – možnost zapisovat ke kterémukoliv místu v paměti po zadání určené adresy. Maximální kapacita paměti je ohraničena velikostí adresové sběrnice.
- Paměť se sekvenčním přístupem (LIFO, FIFO, CD)
 - LIFO – jedná se o paměť zásobníkového typu. Data z ní lze číst přesně v opačném pořadí, v jakém do ní byla zapsána. Tedy poslední zapsaná buňka je čtena jako první.
 - FIFO – jedná se o paměť frontového typu, taktéž nazývána jako buffer. Z paměti jsou data čtena ve stejném pořadí, v jakém byla zapsána. Tedy nejdříve zapsaná položka v paměti je čtena jako první [1] [2] .

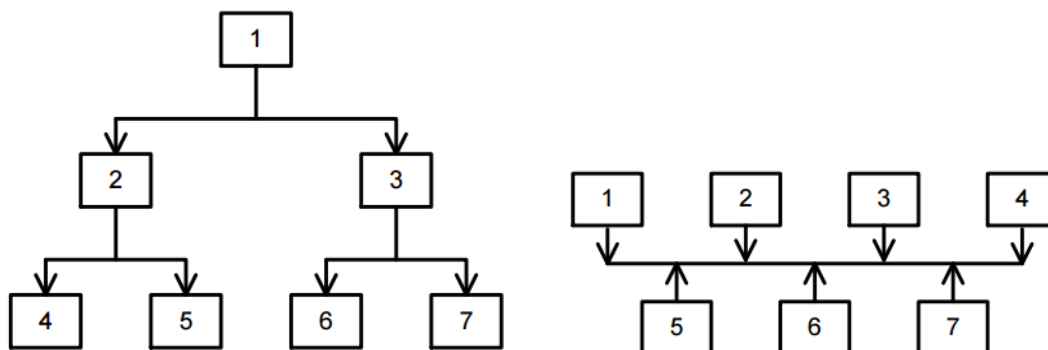
Dle energetické závislosti dělíme:

- Potřebná energie pro zachování informace.
- Nepotřebná energie pro zachování informace [1] [2] .

2.4 Sběrnice (bus) neboli bus system

Je to funkční celek sloužící k propojení dvou či více číslicových systémů a vzájemné přenášení informace mezi nimi. Bývá vybaven prostředky k řízení komunikace, kupříkladu příkazy pro čtení a zápis. Má liniovou strukturu, tedy komunikace dvou jednotek na jedné struktuře (jeden vodič). Výhodou je přímočarost a levnější cena. Nevýhodou je jednoznačné adresování a nutnost řízení protokolu, aby nedošlo ke kolizi [1] [7] .

Vlevo na obrázku 2 je zobrazena stromová struktura bez sběrnice. Jde o komunikaci dvou od sebe vzdálených bodů jen přes zprostředkovatele. Vpravo na obrázku 2 je zobrazena sběrnice struktura. Samostatné bloky komunikují skrz sběrnici za současného dodržení komunikačního protokolu sběrnice [1] .



Obrázek 2: Stromová struktura (vlevo) a sběrnice struktura (vpravo) [1] .

2.5 Komunikace

Komunikační rozhraní dělíme na sériové a paralelní. V případě sériové komunikace se jedná o jeden vodič (komunikační kanál) nebo sběrnici. Data jsou přenášena postupně po jednotlivých bitech (sekvenčně). Paralelní komunikace je opakem komunikace sériové. Dochází k posílání několika bitů najednou po komunikačním kanálu nebo sběrnici. Rozhraní paralelní komunikace obsahuje více vodičů (drátů) [1] [2] [3] [7] .

Analog

Je to signál daný spojitou funkcí ve spojitém čase. Analogový signál je charakterizován spojitou křivkou. Kupříkladu hovoříme-li o napětí, nabývá jeho okamžitá hodnota, kterou se snažíme zjistit, nekonečně mnoha hodnot (dle matematiky hovoříme o intervalu hodnot). Signály obecně, jsou nositeli nějaké informace, nejčastěji fyzikální veličiny. Podle toho analogové signály rozdělujeme např. na akustický, elektrický, optický atd. Tyto signály jsou vytvářeny spojitými systémy a ději. Můžeme hovořit třeba o elektrokardiografickém či elektroencefalografickém signálu. Jeho opakem je signál diskrétní, definovaný v diskrétních časových okamžicích. Rozdíl mezi analogovým a diskrétním signálem je také v kódování. U každého typu je odlišný také způsob jejich zpracování. Vzájemné převádění z jednoho signálu na druhý a naopak, je prováděno pomocí A/D (analogově-digitální) nebo D/A (digitálně-analogový) převodníků podle potřeby. Tento signál lze převést na digitální, a to skupinou určitých dějů (filtrace, zesílení, modulace apod.). Převedení analogového signálu na digitální je potřebné z důvodu procesu zpracovávání výpočetní technikou. Kvůli nesprávnému zpracování vlivem nedokonalých členů dochází ke zkreslení informace. Dejme tomu, že naměřené vstupní napětí je 4 V. Po zpracování a převedení na signál digitální jeho hodnota může být 3,9 V. Analogový signál nelze převést či zpracovat úplně ideálně [7] [1] .

Mezi analogové přístroje můžeme zařadit kupříkladu gramofony, magnetofony, fotoaparáty na kinofilmy či starý typ pevných telefonů. Tento typ přístroje zpracovává analogovou veličinu.

Mezi základní dělení komunikace dále patří: Duplexní a simplexní spojení. Tzv. duplex se využívá pro data, která jsou vedena po vodiči oběma směry. Simplex je spojení, kdy jsou data vedena pouze jedním směrem [1] [7] .

Duplexní spojení dále dělíme na dva typy:

- Half duplex – Spojení má jen jednu linku, která se přepíná. Komunikace probíhá vždy v jednom směru. Příkladem jsou vysílačky.
- Full duplex – Spojení má dvě linky, jedna vede tam a druhá zpět. Můžou vést tedy obě linky najednou. Příkladem je mobilní telefon [1] [4] .

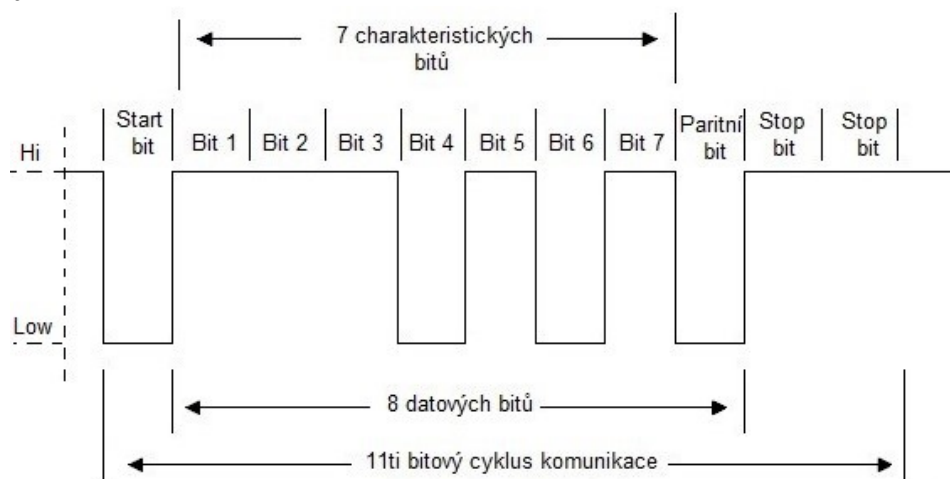
2.6 USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter)

Jedná se o sériové rozhraní, sloužící pro sériovou komunikaci v plně duplexním režimu, které má dva typy. U této komunikace lze nastavit buď asynchronní režim (pro linky RS232) nebo synchronní (SPI). Komunikační signál má v klidovém stavu logickou hodnotu 1. Po zahájení vysílání se jeho hodnota změní na logickou 0 o délce jednoho bitu, jež je pak nazýván start bit. Vyslaný byte z pinu TX (Transmit) se zapíše do registru TXREG a poté jsou bity přepsány do registru pro vysílání (Transmit Shift Register). Dalším krokem je přeposlání dat na pin TX a datům jsou přiřazeny start a stop bit. Díky tomu, že je při UART komunikaci použit registr TXREG, lze během vysílání dat přijímat další. Data

jsou přijímána po detekci start bitu na RX pinu, po němž následuje přenos ostatních bitů po jednom do registru pro příjem, tzv. receive shift register. Po přenesení všech datových bitů je zkontrolován stop bit a data jsou odeslána do bufferu a dále předána do RCREG v případě, že je prázdný. V případě asynchronní komunikace musí mít oba členy stejné parametry (rychlost) přenosu informace, aby se rozdílnými parametry nezpůsobilo chybné přijetí informace nebo chyba přenosu datového slova. Synchronní komunikace bývá označována jako SPI (Serial Peripheral Interface). Slouží ke spojení mikrokontroléru s integrovanými obvody (paměť, A/D převodníky, displej atd.). Jde o komunikaci mezi jedním řídícím členem a více podřízenými členy [4] [3] .

Každý kanál komunikace má své náležité pojmenování:

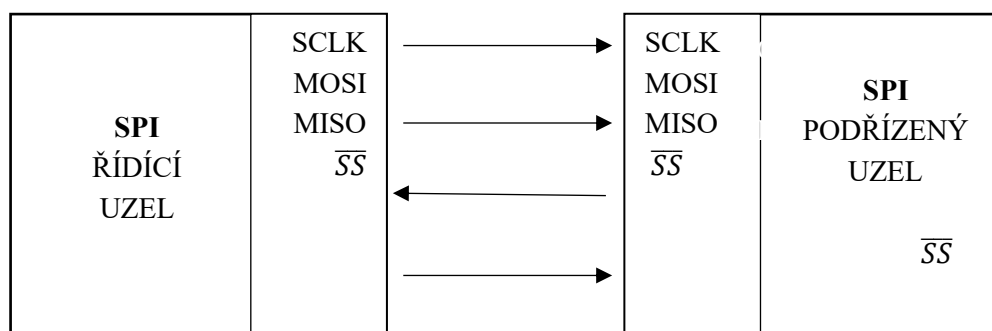
- MISO (Master In Slave Out), jde o vstup do řídicího prvku „master“, kde vstupuje komunikace od podřízených „slave“.
- MOSI (Master Out Slave In), jde o výstup řídicího prvku „master“. Řídící prvek vysílá data do podřízené jednotky „slave“.
 - SS (Slave Select) je příkaz, který vysílá „master“ pro volbu „slave“, se kterým chce komunikovat.
- SCLK, hodinový signál, který vystupuje z řídicí jednotky a určuje rychlost a stav vysílání a přijímání dat [1] [4] .



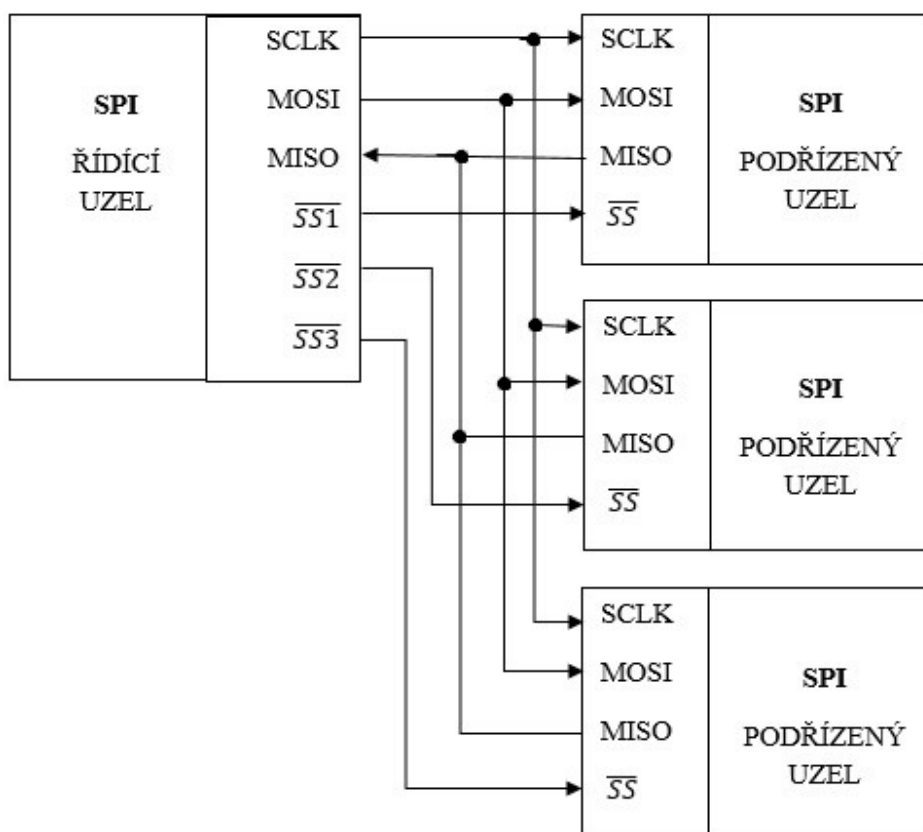
Obrázek 2: UART, častá struktura typu datové komunikace [25]

2.7 SPI (Serial Peripheral Interface).

SPI je sériové periferní rozhraní. Jde o komunikaci mezi mikroprocesory a integrovanými obvody (EEPROM, A/D, displej). Jedná se typ komunikace master versus slave. Komunikace probíhá na společné sběrnici. Určení adresy je realizováno díky speciálním vodičům. Tyto vodiče nastartují příjem a vysílání zvoleného zařízení (pin SS nebo CS) při změně logické hodnoty na 0. Jedná se o komunikaci mezi řídícím uzlem „Master“ a podřízeným uzlem „Slave“. Podřízený uzel může být více než jeden. V případě, že je více těchto podřízených uzlů, tak si „Master“ vybírá příkazem „Slave Select“, se kterým podřízeným uzlem chce komunikovat. Pak „Master“ pošle data, dále hodinový signál („Clock = CLK“) a „Slave“ odpovídá. Tato komunikace je plně duplexní. Může být typu MISO a MOSI. Je synchronní, a to díky účasti hodinového signálu „CLK“ [7] [1] [2] [3] .



Obrázek 3: SPI komunikace, jeden "master" a jeden "slave" [7] [2]



Obrázek 4: SPI komunikace, jeden "master" a více "slave" členů [7] [2]

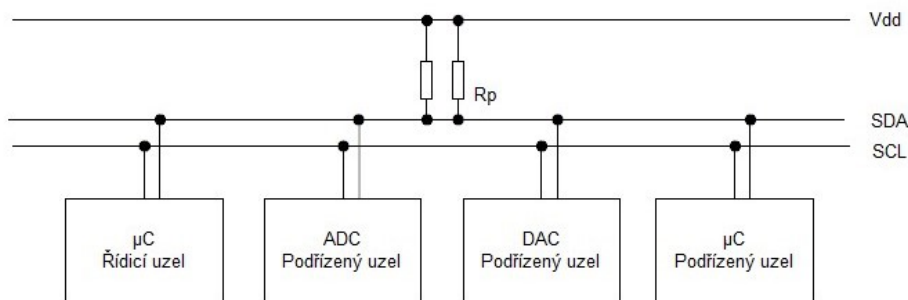
2.8 RS232

RS232 je typické komunikační rozhraní, nazývané sériový port či sériová linka, používané v osobních počítačích a jiné elektronice, dnes používáno převážně v průmyslu. Tato komunikace poskytuje sériový, plně duplexní a asynchronní kontakt mezi dvěma zařízeními. V tomto typu komunikace jsou informace posílány jednotlivě postupně za sebou po jednom bitu. V každém směru po jednom páru vodičů. Pořadí bitů datového přenosu je od nejméně významného bitu (LSB) po bit nejvýznamnější (MSB). Počet bitů při přenosu datové informace je volitelný, nejběžnější je ovšem hodnota 8 či 16. Logický stav, který nabývají přenášená data je definován pomocí dvou možných úrovní napětí. Podle typu zařízení nabývají hodnot ± 5 V, ± 10 V, ± 12 V nebo ± 15 V. Nejběžněji užívaná

varianta je v případě, kdy logické hodnotě 1 odpovídá napětí -12 V a logické hodnotě 0 naopak $+12\text{ V}$. Sériová linka obsahuje základní tři vodiče rozhraní, a to příjem RxD, vysílání TxD a společná zem GND. RxD a TxD jsou datové signály, ostatní jsou signály řídicí. Tyto signály mají navzájem opačnou úroveň logické hodnoty. Pro lepší řízení přenosu komunikace mohou být v sériovém portu obsaženy: vstupy DCD, DSR, CTS, RI, výstupy DTR, RTS). Tyto pomocné vodiče mohou a nemusí být zapojeny, popřípadě je z nich možno napájet další elektronické obvody v zařízení (počítačová myš). V případě běžných sériových portů, je možné nastavit různou rychlost přenosu, např. 9600, 19200 či 115200 bd. Přenosová rychlost je vždy nižší než rychlost v baudech, protože ke každým osmi datovým bitům se navíc přenáší ještě „start bit“, „stop bit“, popřípadě také paritní bit, který slouží jako základní kontrola správnosti přenosu. Z důvodu asynchronního přenosu, je nutné přesně nastavit rychlost přenosu na obou zařízeních, aby nedošlo ke zkreslení a chybnému přenosu informace **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**[2] .

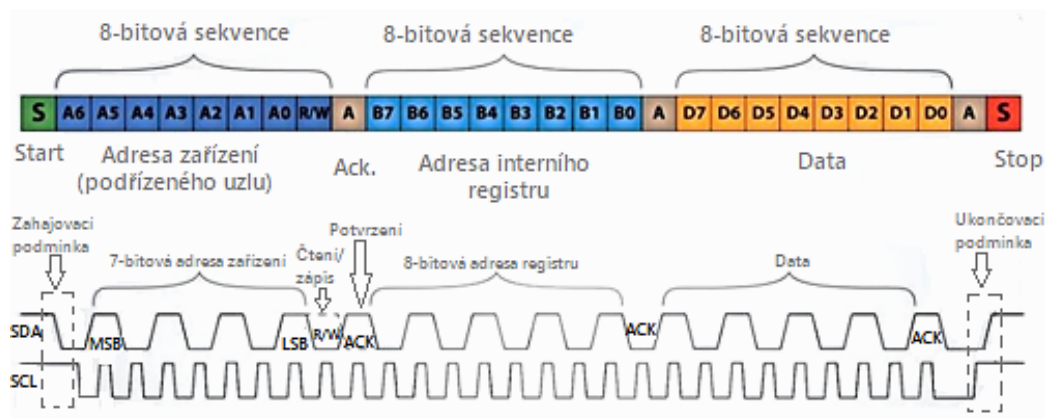
2.9 I²C

I²C je multimasterová (více řídicích uzlů), synchronní a poloduplexní komunikace s jednoduchou konstrukcí, realizována pomocí linky s otevřenými (open-drain) kolektory. Užívá se k připojování nízko-rychlostních periférií k základní desce, vestavěnému systému či mobilnímu telefonu. Součástí je sériová datová linka „SDA“ (nesoucí data), sériové hodiny „SCL“ (synchronizují komunikaci mezi řídicími a podřízenými uzly), pull-up rezistory připojenými na „SCL“ a „SDA“. V tomto případě „Master“ zahájí komunikaci. Ta probíhá s prvním „Slavem“, poté s dalším. Až proces proběhne, může řídicí uzel znova vysílat. Posílání dat přenosu je zahájeno „MSB“ (most significant bit) a končí „LSB“ (least significant bit). Přenos dat je zahájen Start bitem (S) v okamžiku, kdy je „SDA“ nízká, nachází se tedy ve stavu logické nuly „0“. „SCL“ v tomto případě zůstává vysoká, nachází se tedy ve stavu logické jedna „1“ [3] [12] .



Obrázek 5: I²C struktura komunikace, jeden "master" a tři "slave". [6]

Poté se „CLK“ změní, a při každém pulsu hodinového signálu jsou posílána data. Po sedmém datovém bitu následuje bit, který určuje, zda jde o čtení či zápis (R/W = Read/Write) do podřízeného uzlu. Dále je poslán „ACK“ (Acknowledge), což je potvrzení od pořázeného uzlu, zda obdržel předešlou informaci. Opakem je Not Acknowledge, že neobdržel podřízený uzel informaci, popřípadě je zaneprázdněný či nerozumí přijímaným datům. Tento proces funguje třikrát po sobě. Poprvé je posílána řídicím uzlem 7 bitová adresa podřízeného uzlu. V druhém cyklu je posílána 8 bitová adresa registru, se kterým chceme pracovat a jako poslední probíhá samotný přenos dat. Když je přenos dokončen, poslední je poslán STOP bit (P) pro uvolnění datové linky. Dojde ke změně „SDA“ na „1“, zatímco „SCL“ bude trvale „1“ [8] [7] [12] .



Obrázek 6: Časový diagram a struktura posílaných dat I²C komunikace. [12]

2.10 Periferie

Vybavení mikrokontrolérů periferními obvody je poměrně rozličné. Mnohdy je vyráběn jeden typ mikrokontroléru v mnoha variantách, které se liší právě periferními obvody. V závislosti na složitosti a počtu pinů můžeme pro komunikaci s okolím používat různá vstupní nebo výstupní zařízení. Danými charakteristikami jsou potom varianty MCU určené pro jistou konkrétní třídu aplikací, například řízení elektrických pohonů, ovládání komunikačního zařízení, sběr dat z technologického procesu apod. Většina mikrokontrolérů bývá vybavena jedním nebo více paralelními porty, které lze použít pro vstup a výstup binárních dat. Obvykle lze pracovat s celým portem najednou nebo samostatně ovládat jednotlivé bity portu. Pro komunikaci s okolím jako jsou další mikrokontroléry, ovládací panely nebo nadřazené počítače, bývají mikrokontroléry vybaveny nejméně jednou, někdy ale až pěti sériovými komunikačními linkami. Periferní oblast může být vybavena např. čítači, časovači, PWM generátorem, A/D převodníky, různé typy komunikace (SPI, UART, I²C). Sériová rozhraní s těmito protokoly jsou používána pro připojování vnějších pamětí s jinými typy komunikací, vnějších A/D a D/A převodníků, obvodů RTC (Real Time Clock) pro měření času, watchdog, timer, řadič displeje, řadič klávesnice, programovatelné hradlové pole [7] [3].

2.10.1 Čítač (Counter) a časovač (Timer)

Tyto obvody představují standardní vybavení mikrokontrolérů. Čítač je vyhrazený registr, jemuž se přičítá jedna při zjištění náběžné či sestupné hrany ve sledovaném signálu. Časovač je místo v paměti, jemuž taktéž přičítáme jedničku. To znamená, že funguje podobně jako čítač s tím rozdílem, že čítá s frekvencí hodinového signálu u mikrokontroléru. Časovač sleduje vnitřní signál, u kterého známe průběh a konstantní frekvenci, tedy hodinový signál. Vytváří určitý interval času [2] [7].

2.10.2 PWM generátor

Jde o generátor signálových nebo výkonových impulsů pro zkoušku akčních členů řízených signálem PWM. *Pulsně šířková modulace – PWM (Pulse Width Modulation)* je diskretní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvoustavového signálu. Pulsně šířková modulace bývá často využívána ve výkonové elektronice pro řízení velikosti napětí nebo proudu. Informace v signálu PWM je přenášena pomocí střídavosti. Přenosový signál může nabývat hodnot zapnuto/vypnuto tj. log.0/log.1. Střídá se tedy informace "zakódována" jako poměr mezi stavy zapnuto/vypnuto. Cyklus, kdy dojde k přenosu jedné střídavosti, je nazýván periodou. PWM má omezení, a to v rozmezí 0–100 %. Ve skutečnosti

jednoduché zapojení obsahuje jen potenciometr, kterým se střída nastavuje, mikrokontrolér a blokovací kondenzátor v napájení [7] [1] .

2.10.3 A/D a D/A převodníky

Analogově-digitální převodník je elektronická součástka sloužící pro převádění spojitého (tedy analogového) signálu na signál diskrétní (rovněž digitální). Pro opačný postup slouží digitálně-analogový převodník. Tento proces umožňuje zpracování originálního analogového signálu na číslicových počítačích. Nyní je převážná většina tvořena digitálními signálními procesory DSP, které jsou uzpůsobené na tento typ zpracovávání signálů. Výhoda převodu signálu do digitální podoby je především kvalitnější přenos, záznam a zpracování dat [1] [7] .

3 Popis možností napájecích zdrojů využívající dobíjecí baterie

Tato kapitola se zabývá napájecími zdroji, které jsou rozděleny na primární a sekundární články. Jednotlivé typy článků jsou podrobněji popsány. Zdroji, který byl vybrán pro tuto diplomovou práci, se věnuje kapitola důkladněji.

3.1 Zdroje energie

Baterie jsou skupinou elektrických článků a obecně slouží pro mobilní zdroje elektrických energií. Jsou neodmyslitelnou částí všech oblastí našeho života. Díky svým vlastnostem dovolují komunikaci a práci mimo dosah rozvodné sítě. Existuje velké množství druhů baterií, a každá aplikace mohou využívat jiný typ. Slouží především k napájení menších přístrojů, například přenosné elektrické nářadí, různé typy pomůcek, mobilů, zdravotnického vybavení a mnoho dalších. Baterie dělíme na primární a sekundární články [5] .

3.1.1 Primární články

Na rozdíl od sekundárních článků, primární poskytují energii ihned po vlastním sestavení. Nejvýznamnější nevýhodou je fakt, že je po vybití již nelze znovu dobít. Proto je potřebné baterie pravidelně vyměňovat. Vynikají mnoha přednostmi, jako je vysoká kapacita či teplotní stabilita [27] [5] .

3.1.2 Sekundární články

Tyto články jsou opakem článků primárních, tudíž se po vybití dají znovu nabít (např. akumulátor). Zařízení pro hromadění energie jsou dobrou alternativou (nebo dodatkem) k primárním bateriím. Kombinace primárních baterií a jiných zdrojů pro získávání a hromadění energie mohou být také využity pro pohon a napájení požadovaných objektů [27] [5] .

3.2 Akumulátor (sekundární galvanický článek)

Akumulátor je zařízení, které slouží k opakovanému uskladňování energie. Jedná se o sekundární článek. Akumulátory dělíme dle jejich konstrukce, tedy způsobu akumulace elektrické energie, na elektrochemické, tepelné, mechanické, elektromagnetické apod. Můžeme je použít v jakékoliv oblasti životního prostředí, kde není dostupné jiné energetické zařízení. Jsou vhodné pro různorodé klimatické podmínky (tropické, polární oblasti apod.). Díky většímu množství typů akumulátorů a jejich specifických vlastností lze vybrat takový článek, který je vhodný pro danou problematiku a okolnosti. Důležitými specifiky pro jednotlivé typy jsou: Dostupný špičkový výkon, kapacita článku, životnost, hustota energie, nízká míra samovybití, účinnost, vnitřní odpor, nabíjecí proud a cena [10] .

Elektrochemické akumulátory pracují na principu přeměny elektrické energie na chemickou a naopak, díky procházejícímu proudu. Výsledkem procesu je rozdílný elektrochemický potenciál mezi elektrodami. Z nich je poté čerpána elektrická energie zpět. Běžné napětí (elektrochemický rozdílný potenciál) se pohybuje okolo 1,2 - 3,7V. Životnost elektrochemických akumulátorů se v převážné většině případů nalézá v rozmezí stovek vybíjecích a nabíjecích cyklů. Současně se snižováním životnosti klesá kapacita součástky z důvodu chemické koroze na elektrodách. Na životnost má také vliv způsob vybíjení a nabíjení součástky a rovněž podmínky, za kterých je provozována (např. teplota, vlhkost) [10] [5] .

Existuje velké množství typů akumulátorů: olověný (Pb), nikl-kadmiový (NiCd), nikl-metal hydridový (NiMH), nikl-železný (Ni-Fe), stříbro-zinkový, lithium-iontový (Li-ion), lithium-polymerový (Li-Pol), lithium-železo-fosfátový akumulátor LiFePO_4 (Li-FePO_4) [5] [10] [9] . Nejběžnějšími a nejvíce užívanými elektrochemickými akumulátory jsou:

Olověné (Pb) baterie

Typ článku založený na elektrochemické reakci na elektrodách z olova vložených do elektrolytu z kyseliny sírové. Tento typ je používán nejčastěji, a to z důvodu nízkých nákladů, vysoké spolehlivosti a efektivity. Nicméně jsou charakteristické relativně nízkou životností a špatným výkonem při teplotách pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nad $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5] .

Nikl-kadmiové (NiCd) baterie

Jedná se o elektrochemický článek složený z kadmia, tvořící katodu, a oxidu hydroxidu niklu, tvořící anodu. Elektrolytem je v tomto případě hydroxid draselný. NiCd baterie mají vyšší měrnou energii, ale mají poměrně nízkou životnost a vyšší náklady. V porovnání s předešlými akumulátory odolávají extrémnějším podmínkám (-40°C až $+60^{\circ}\text{C}$). Významnou výhodou je jejich schopnost úplného vybití bez větší ztráty kapacity, životnosti či účinnosti. Oproti tomu nevýhodou je v NiCd bateriích přítomnost kadmia, které je velmi toxické [5] [9] .

Superkondenzátory

Speciální dvouvrstvý elektrický kondenzátor (EDLC=electric double-layer capacitor) je součástí elektrochemického akumulátoru, který se nazývá superkondenzátor. Superkondenzátory mají velkou životnost. Pracují v širokém rozsahu teplot -55°C až $+85^{\circ}\text{C}$, bez významné ztráty kapacity. Jejich provozní životnost dosahuje až 10-ti let, a až následně je jejich kapacita snížena na 80%. Oproti např. kadmiové toxické baterii jsou poměrně šetrné k životnímu prostředí. Ovšem významnou nevýhodou je nízká hustota energie a vysoký unikající proud ve srovnání s výše zmíněnými bateriemi. Jejich samovybití je asi 5 % za den, což je činí nevhodné pro dlouhodobé skladování energie, v situaci, kdy jsou průběžně dobíjeny [5] [10] .

Kromě lithium-iontové baterie mají ostatní baterie problém s funkcí při nižších teplotách. Tato vlastnost je způsobena zvýšením jejich vnitřního odporu a z toho vyplývá ztráta kapacity. V případě následného opětovného zvýšení teploty lze zjistit významné zkrácení jejich životnosti, nebo dokonce trvalé poškození [5] [10] .

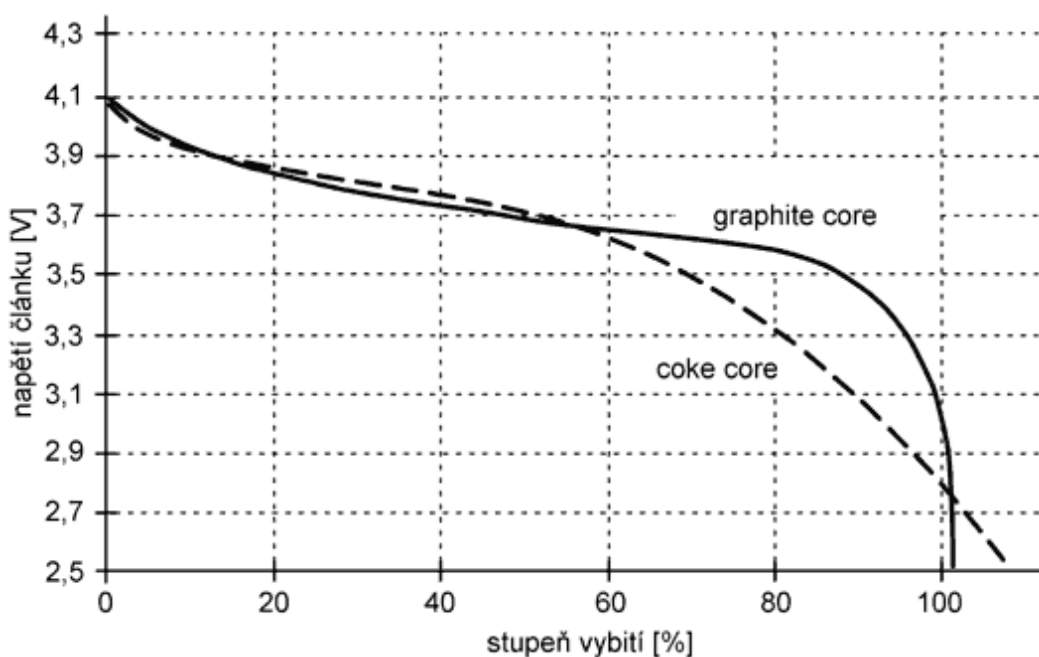
Lithium-iontová (Li-Ion) baterie

Jsou vyrobeny z uhlíku (anoda), oxidu kovu (katoda) a vloženy do elektrolytu z lithiové soli v organickém rozpouštědle. Mají vysokou účinnost, hustotu výkonu a napětí článku, díky čemu je velice vhodná pro přenosná zařízení. Z důvodu přítomnosti lithia je možné riziko vzniku požáru při zvýšené vlhkosti. Baterie má relativně vysoké náklady [5] . Konečné nabíjecí napětí Lithium-Iontové baterie se může pohybovat nejčastěji v rozmezí od 4,0 V do 4,3 V (podle materiálu, z něhož je vyrobena). Souhlasně také funguje konečné vybíjecí napětí, kde jsou hodnoty charakterizovány od 2,5 V do 3,0 V. Z tohoto důvodu je třeba pro konstrukci nového zařízení ověřit katalogové údaje od výrobce pro daný článek. Podle materiálu, z něhož je vyrobeno jádro Li-Iontové baterie, se liší charakteristiky baterie popsané v tabulce níže [27] [24] .

Tabulka 1: Typy Li-ion akumulátorů [27]

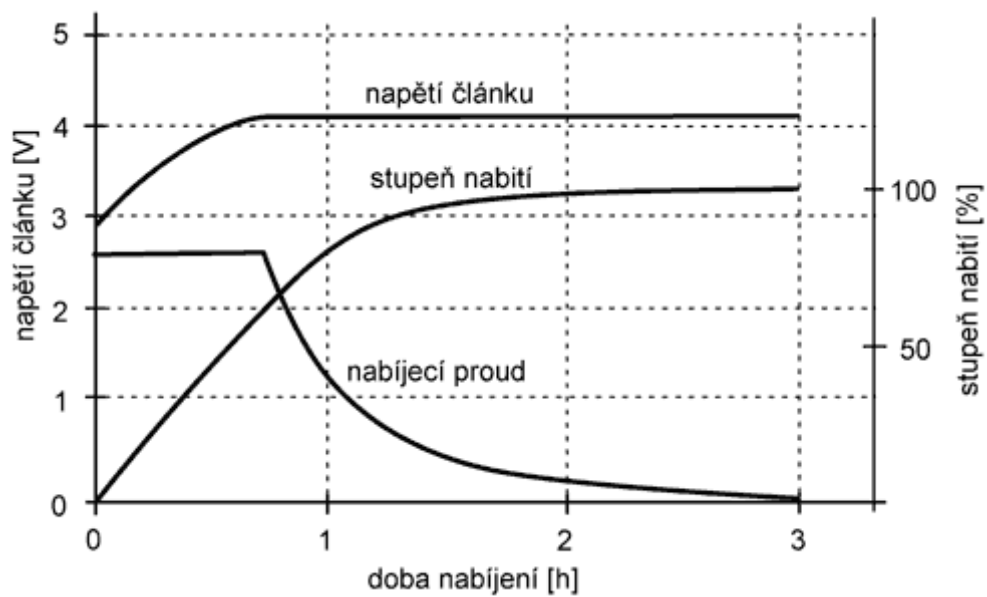
Typ materiálu jádra	Maximální nabíjecí napětí [V]	Konečné vybíjecí napětí [V]
Koks	4,2	2,5
Grafit	4,1	3,0

V praxi jsou v dnešní době dostupné dva typy Li-ion akumulátorů, které se odlišují provedením záporné elektrody (u akumulátorů tedy anoda). U obou typů je materiálem uhlík, ale v jiném provedení. V prvním se jedná o „koks“ (z angličtiny „coke“), v druhém ve formě grafitu. Tyto akumulátory se liší tvarem vybíjecí křivky (Obrázek 7), dále také nabíjecím napětím a napětím, při kterém je třeba ukončit vybíjení (Obrázek 8) [27] [5] .



Obrázek 7: Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion (pro jednotlivé typy) [26]

Při nabíjení Li-ion článků je důležité přesně dodržovat konečné nabíjecí napětí (cca s přesností $\pm 1\%$). I mírné překročení může způsobit poškození článku a zkrácení doby jeho životnosti. Naopak při napětí menším se článek nenabije na plnou kapacitu. V případě dobíjecího proudu není nutné hodnoty dodržovat přesně, jelikož v případě menšího dobíjecího proudu se baterie bude pouze dobíjet delší dobu [27] [5] .



Obrázek 8: Průběh napětí a proudu při nabíjení akumulátoru Li-ion [27]

Tabulka 2: Přehled vlastností akumulátorových baterií [5] [9] [10]

Typ baterie	Hustota energie [Wh/kg]	Samovybíjení [% / měsíc]	Životnost [cykly]	Napětí článku [V]
Pb	40-60	3-20	500-1000	2,105
NiCd	50-60	10	1000-2000	-
Li-Ion	75-200	5	500-1200	3,7
Superkapacitor	5-15	5	10000-100000	-



Obrázek 9: Li-ion baterie 6SP652535použitá v měřicím řetězci [24]

4 Rešerše metod a strategií low-power napájení

Klíčová slova: low-power napájení, metody low-power napájení, strategie řízení energie

Key words: low-power supply, low-power supply methods, energy management strategies

Vybrané knihovny zdrojů: ACM Digital Library, IEEE Xplore, OECD iLibrary, Scopus, Web of Science.

Pro rešerši byly použity zdroje:

- a. An Autonomous Power Supply System Supporting Low-Power Wireless Sensors [20]
- b. Low-Power Digital Design [19]
- c. A low-power design method using multiple supply voltages [21]
- d. SMART SENSORS NETWORKS: COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND INTELLIGENT APPLICATIONS. Kapitola: Intelligent Energy Management for Environmental Monitoring Systems [5]
- e. A comparative analysis of power and energy management techniques in real embedded applications. [18]
- f. Low Power Design Methodologies. [28]
- g. Low power design methodologies for mobile communication [29]

Vzhledem k rozvoji průmyslu bezdrátových zařízení je důležité zlepšovat a inovovat řízení energie v zařízeních. Jde o úpravu low-power režimů v oblasti spotřeby energie a nových bateriově provozovaných zařízení. Pro tvorbu vhodného low-power zařízení je důležité určit požadované systémové požadavky, volba architektury procesoru a systému hardwaru a softwaru. Nezbytnou součástí je stanovit seznam funkcí, protože každá má vliv na vývoj systému a spotřebu energie celku. Každé zavedení funkce zahrnuje formulaci specifikace, dokumentaci, implementaci, ověřování designu, programování, podporu produktu a další. Při kompletaci nové funkce by měly být objasněny následující parametry: zda dojde aplikací funkce ke zvýšení energetické účinnosti, zda se zvyšuje pravděpodobnost větší úspěšnosti produktu, celková životnost, vliv na maximální provozní frekvence apod. [29] [17] .

Celková spotřeba energie se skládá ze dvou typů, statická a dynamická. Statická síla typicky pochází z unikajících a stejnosměrných proudů zdrojů. Dynamická spotřeba proudu je frekvenčně závislá, a často dominuje celkový výkon. Pochází z nabíjení a vybíjení kapacitních uzlů a působení spínacích tranzistorů. Řízení spotřeby elektrické energie může být aplikováno na třech různých úrovních: mikrokontroléru (MCU), uzlů a sítí. Co se týče úrovně techniky MCU, jde o řízení optimalizace ztrátového výkonu mikroprocesoru. Současně zahrnuje výběr jednotky mikrokontroléru a případné využití dynamických změn napětí a škálování frekvence. Co se týče techniky na úrovni uzlů, jde o zaměření se na přizpůsobení výkonu zařízení v závislosti na změnách času, vzhledem k dostupnosti energie a snímání, výpočetní a datové komunikace. Nakonec, o optimalizaci na úrovni sítí, hovoříme o optimalizaci hustoty uzlu dat, směrování a synchronizaci komunikačních akcí v celých síťových snímacích systémech [19] [21] [5] .

Úspěšná strategie hospodaření s energií není banalitou, protože musíme brát v úvahu všechny aspekty systému. Začíná s designem nízko-výkonového systému a všech jeho součástí a z toho vyplývající používání účinných technik přeměny energie. To zahrnuje řadu technik v oblasti řízení energie, jako je třeba plánování energie, životnost atd. Běžně používané techniky, které byly nalezeny v literatuře, jsou shrnuty v tabulce 2. Použití těchto metod musí být vázáno na hardwarovou konfiguraci. Například běžně používaný střídavý cyklus funkce vyžaduje, aby základní hardware podporoval spánkový režim [28] [29] .

Jednotlivé metody řízení spotřeby energie, jsou popsány v následujícím odstavci, mohou být kombinovány k vytvoření strategie pro hospodaření s energií uvedené v tabulce [5] [17] .

Tabulka 3: Techniky řízení energie [28] [20] [5]

Strategie	
Sledování bodu maximálního výkonu	MPPT
Dynamické napěťové škálování	DVS
Dynamické frekvenční škálování	DFS
Adaptivní střída	
Dynamické napěťové škálování a dynamické frekvenční škálování	DVFS
Dimenzování tranzistorů	
Dynamické přepínání energie	DPS

V následujícím textu jsou zmíněny a podrobněji popsány techniky řízení energie.

4.1 Sledování bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracking MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) je technika, která umožňuje převedení maximální dostupné energie ze snímače. Energetické převodníky, jako jsou solární panely, mají nelineární charakteristické výkonové křivky. Optimální zatížení maximálního výkonu závisí na provozním bodu pro dané podmínky. Tato technika vyžaduje sledování příchozí energie, stanovení optimálního provozního bodu a přizpůsobení zátěže. Optimální zatížení může využívat řadu různých technik. Systém řízení výkonové energie MPPT byl navržen, aby řídil spotřebu energie pro zařízení pohánějící bezdrátové senzorové sítě. Tento systém používá nabíjecí čerpadlo s provozní frekvencí, která se upraví na maximální výstupní výkon na baterie nebo MCU. Podobná práce byla představena pro použití MPPT proti vibracím pro získávání energie. Jednotka řízení spotřeby aktivuje různé provozní režimy a odpovídající zatížení na dostupné úrovni energie [5] [18] [19] .

4.2 Dynamické přepínání energie (Dynamic Power Switching – DPS)

Vytvoření několika výkonových částí v architektuře může snížit celkovou spotřebu energie. Díky umožnění řízení spotřeby tak, že se dodává minimum energie do částí, které nejsou využívány v daném časovém období. Jde o inteligentní řízení výkonu pro monitorování a zpracování v každé části systému. Další je možnost dynamicky přepínat do režimu nižší spotřeby elektrické energie, když není prvek využíván a dodávat energii v momentu, kdy je prvek vyzván k procesu [5] [18] [19]

4.3 Střída

V případě střídání se jedná o periodické nastavení režimu. Dochází k pravidelnému střídání a jednotlivá zatížení vypnou (nebo nastaví do úsporného režimu), když nejsou potřeba. Tím dojde ke snížení celkové spotřeby energie systému. Režimy spánku jsou podporované většinou MCU a komunikačními moduly. Princip střídání je přímočarý přístup velmi často používaný při monitorování životního prostředí a energetických systémů sklizení. Nejjednodušší statická implementace této techniky je nastavit pevný pracovní cyklus tak, aby průměrná spotřeba energie odpovídala průměrné produkci energie.

Tento přístup však trpí také nedostatky. Pokud zdroj energie produkuje nadbytečné množství energie, a toto množství nespotřebuje, systém s pevným pracovním cyklem střidy ztratí přebývající energii v momentě, kdy bude zásobovací prvek plně nabit. Naopak, je-li spotřeba energie vyšší než produkuje zdroj energie, dojde k vyčerpání zásob ve skladovacím prvku a systém přestane pracovat. Proto vyžaduje proměnný charakter dostupnosti v oblasti životního prostředí použití dynamické střidy. Dojde k lepšímu nastavení zásobování v případě přebytku, a naopak ke snížení pracovního cyklu v případě nedostatku. Z toho vyplývá skutečnost, že skladování energie není ideální, a takto nastrádaná energie by měla být použita přímo, nikoli uložena jako první [5] [18] [19] .

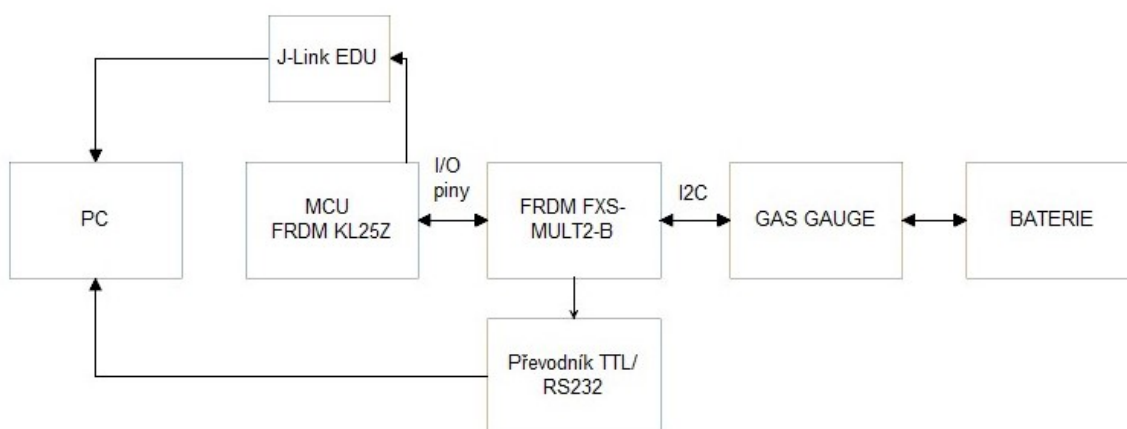
4.4 Dynamické napět'ové škálování a dynamické frekvenční škálování (DVFS)

Zatímco aplikace střidy může poskytnout významné úspory energie v nečinných stavech, může být přídavná energie konzervovaná optimalizací systému výkonu v aktivním stavu. Existují dvě účinné techniky pro snížení spotřeby energie procesoru: dynamické škálování napětí (DVS) a dynamické škálování frekvence (DFS). Jejich základním předpokladem je, že mikrokontrolér a jeho provozní napětí a frekvence může být upravena tak, aby odpovídala požadavkům okamžitého zpracování. DVS snižuje provozní napětí MCU (nebo jiných obvodů), které způsobí, snížení s druhým čtvercem při zapnutí napájení. Snížení provozní frekvence pomocí DFS snižuje spínací výkon lineárně, a tedy nemá efekt na celkovou spotřebu paliva v jednom úkolu. Nicméně, může být použita k prodloužení spotřeby energie na delší dobu v případě nízké dostupnosti energie. V obou případech mikrokontrolér pracuje pomalejším tempem, přesto zůstává aktivní. Obě techniky mohou být také kombinovány, a tehdy jde o dynamické škálování napětí a dynamické škálování frekvence. Škálovací techniky umožňují, aby se systém udržel v provozu v pomalém tempu, ale ne na úkor provedení důležitých úkolů. Ve srovnání s adaptivní střidou tedy úplně nezastaví všechny úkoly. Technika založená na dynamickém škálování napětí pro bateriové systémy obsahuje protokol pro statistickou záruku výkonu v aktuálním stavu. Příkladem systému DVFS pro dynamickou správu napájení vestavěný MCU [5] [18] [19] [17] .

5 Návrh a konstrukce vlastního řešení funkčního vzorku zařízení

V této fázi práce bude konstruován funkční vzorek zařízení, tedy měřicí řetězec. Měřicí řetězec se skládá z mikrokontroléru, zátěže a baterie. Pro tuto práci byl vybrán mikrokontrolér firmy Freescale FRDM-KL25Z. Jako zátěž poslouží senzor FRDM-FXS-MULT2-B. Tato senzorová deska slouží pro rozšíření aplikací a je kompatibilní s mnoha MCU této firmy. Na zmíněné multisenzorové desce je obsaženo větší množství sensorů, jak bylo zmíněno v kapitole 5.2. Mikrokontrolér a senzorová deska jsou propojeny vstupně-výstupními piny. Mikrokontrolér je napájen z USB (pomocí něhož je připojen k počítači) nebo z baterie. Aby bylo možno monitorovat nabití baterie, je nutno mít v měřicím vzorku obsažený Gas Gauge obvod, popsáný v kapitole 5.3. Vybraný mikrokontrolér tento obvod neobsahuje, proto bylo nutno jej dodatečně připojit. Gas Gauge obvod je napojen na mikrokontrolér, aby monitoroval baterii. Kladný pól baterie je připojen na napájecí pin V_BAT a záporný pól na zemnicí pin GND Gas Gauge obvodu. Komunikace mikrokontrolér – Gas Gauge je realizována komunikačním rozhraním I²C, které je blíže charakterizováno v kapitole 2.9. Pro přenos naměřených dat z mikrokontroléru do počítače je připojen převodník úrovní TTL ↔ RS232. Pomocí převodníku dochází k výpisu dat načtených z registrů do programu na sériový port. Hodnota registru, která informuje o stavu nabití baterie (a další vybrané registry) je přes tuto linku posílána do počítače. Proto pokud je mikrokontrolér připojen přes USB, baterie se jeví stále jako plně nabitá. Z tohoto důvodu je zde nutný jiný způsob posílání dat z měřicího řetězce. Díky této aplikaci vidíme skutečné informace obsažené v registru. Druhou možností přenosu dat je vizualizační software J-Scope a přenášení dat přes ladící sondu J-Link.

Na následujícím Obrázek 10 lze vidět blokové schéma zapojení realizovaného low-power měřicího řetězce.



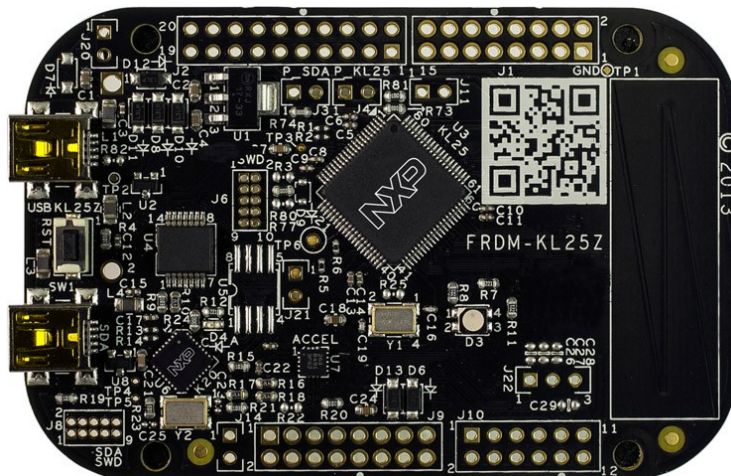
Obrázek 10: Blokové schéma zapojení navrženého měřicího řetězce

5.1 FRDM-KL25Z

FRDM-KL25Z, konkrétně MKL25Z128VLK4 MCU, je vývojová platforma pro Kinetis řady L postavena na ARM® Cortex™ -M0 + procesoru. Mezi přednosti mikrokontroléru patří snadný přístup k I/O pinům, nízká spotřeba při provozu, možnost připojení baterie. Dále je typický standardním uspořádáním zařízení (tzv. „form factor“) s možností rozšíření, vestavěným rozhraním pro ladění OpenSDA, a také P&E Multilink pro ladění programu (tzv. „run-control“).

FRDM-KL25Z je podporován řadou vývojových softwarů firmy NXP a třetích stran. Zařízení poskytuje pracovní frekvenci 48 MHz, 128 kB paměť, vysokorychlostní řadič USB, analogové

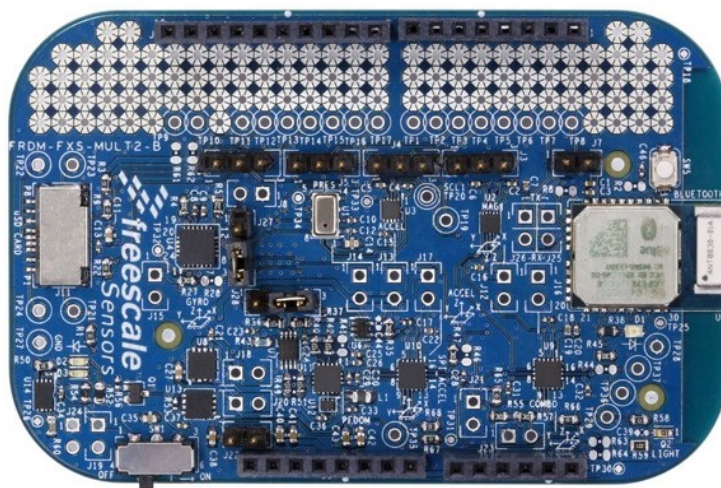
a digitální periferie. Rozhraní také zahrnuje tříbarevnou RGB diodu, tříosý akcelerometr a dotykový kapacitní posuvník [14] .



Obrázek 11: Vývojová platforma FRDM KL25Z [14]

5.2 FRDM-FXS-MULT2-B

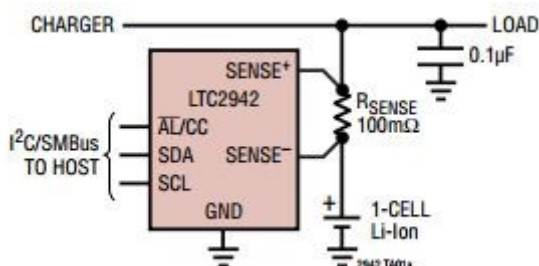
FRDM-FXS-MULT2-B je rozšiřující senzorová deska. Obsahuje tříosý digitální akcelerometr MMA8652FC, tříosý lineární akcelerometr FXLS8471Q, tříosý digitální magnetometr MAG3110, tříosý digitální gyroskop FXAS21002C, tlakový senzor MPL3115A2, šestiosý lineární integrovaný akcelerometr a magnetometr FXOS8700CQ (tříosý lineární akcelerometr a tříosý magnetometr), senzor pro snímání pohybu, tzv. pedometr, MMA9553L. Mezi přednosti patří snadný přístup k MCU pomocí I/O pinů, se kterými může být propojen. Díky všem těmto senzorům nabízí tato platforma 12-osé snímání. Součástí je také bezdrátová komunikace pomocí Bluetooth rozhraní [13] .



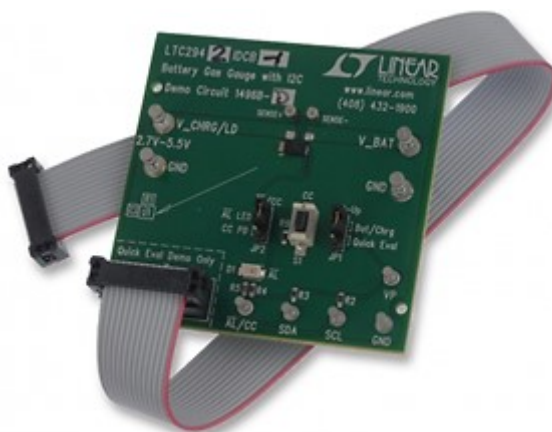
Obrázek 12: Rozšiřující vývojová platforma FRDM-FXS-MULT2B [13]

5.3 Gas Gauge

Gas Gauge je obvod, který slouží k monitorování stavu baterie. Je využit pro měření úrovně kapacity baterie (nabití/vybití). Pro měřicí řetězec je použit obvod Gas Gauge firmy Linear Technology typ LTC2942-Battery Gas Gauge with Temperature, Voltage Measurement. Tento obvod měří stav kapacity baterie, napětí baterie a teplotu na čipu obvodu. Pracovní rozsah tohoto Gas Gauge je vhodný pro samostatné Li-Ion baterie. Princip je založen na „coulomb counter“, tedy integruje proud přes odpor (ke Gas Gauge připojen „sense resistor“) mezi kladným pólem baterie a zátěží nebo baterií. Nabití baterie a teplota na obvodové desce je měřena interním 14bitovým A/D převodníkem. Všechny měřené veličiny jsou uloženy do vnitřních registrů. Registry jsou přístupné pomocí sériové komunikace SMBus/I²C rozhraní. V případě překročení prahové hodnoty přístroj upozorní pomocí komunikačního rozhraní protokolem SMBus nebo nastaví příznak ve vnitřním stavovém registru [11] .



Obrázek 13: Typické zapojení obvodu Gas Gauge [11]



Obrázek 14: Monitorovací obvod baterie "Gas Gauge" LTC2942 [11]

Obvod Gas Gauge LTC2942 slouží pro monitorování baterie Li-ion baterie 6SP652535. Tento obvod komunikuje s řídicím zařízením (MCU KL25Z) použitím rozhraní kompatibilního s I²C. Gas Gauge obvod má I²C 7bitovou adresu 1100100. Obvod je pouze typu podřízeného uzlu (hodinový signál (SCL) pouze na vstupu a datový signál (SDA) je obousměrný). Obvod integruje proud přes snímací odpor a měří napětí baterie a teplotu. Hodnoty ukládá do interních 16bitových registrů, které jsou přístupné přes komunikaci I²C. Součástí registrů je možnost naprogramovat nižší a vyšší prahy pro každý měřený parametr. Funkcí Gas Gauge obvodů je poté tyto prahy monitorovat. V případě překročení prahové hodnoty dojde k upozornění (více v odstavci výše). Při aktivaci pohotovostního módu pin AL/CC nastaví nízkou hodnotu. V tabulce níže je k vidění mapa registrů. Použité zkratky v mapě registrů: R = Read, W = Write, X = Unknown, R/W (čtení/zápis) [11] .

Tabulka 4: Mapa registrů Gas Gauge obvodu LTC2942 [11]

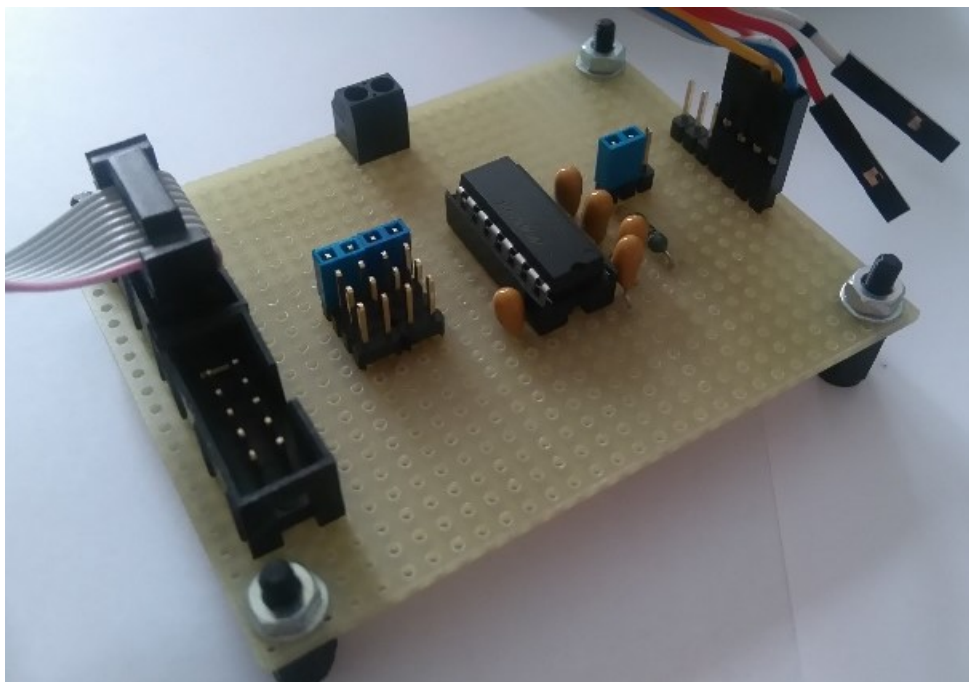
ADRESA	NÁZEV	POPIS REGISTRŮ	R/W	VÝCHOZÍ
00h	A	Status	R	See Below
01h	B	Control	R/W	3Ch
02h	C	Akumulovaný náboj MSB	R/W	7Fh
03h	D	Akumulovaný náboj LSB	R/W	FFh
04h	E	Práh náboje vyšší MSB	R/W	FFh
05h	F	Práh náboje vyšší LSB	R/W	FFh
06h	G	Práh náboje nižší MSB	R/W	00h
07h	H	Práh náboje nižší LSB	R/W	00h
08h	I	Napětí MSB	R	XXh
09h	J	Napětí LSB	R	XXh
0Ah	K	Napěťový práh vyšší	R/W	FFh
0Bh	L	Napěťový práh nižší	R/W	00h
0Ch	M	Teplota MSB	R	XXh
0Dh	N	Teplota LSB	R	XXh
0Eh	O	Teplotní práh vyšší	R/W	FFh
0Fh	P	Teplotní práh nižší	R/W	00h

5.4 Baterie

Pro měřicí řetězec je použita polymerová baterie Li-Ion 6SP652535 [24] . Kapacita baterie je 400 mAh, napětí 3,7 V, maximální vybíjecí proud 80 mA a maximální nabíjecí proud 400 mA. Tento typ baterie je určen pro přenosná zařízení. Charakteristika Li-Ion baterie je popsána v kapitole 0.

5.5 Převodník TTL↔RS232

Jedná se o převodník elektrických úrovní TTL na RS232. Převodníky se uplatňují při odlaďování konstrukcí s mikrokontroléry nebo při ladění sériové komunikace. V měřicím řetězci je převodník připojen přes USB kabel Chipi-X. Na druhé straně jsou spojeny země převodníku a mikrokontroléru a pin TX (přijímání přenosu dat).



Obrázek 15: Převodník TTL-RS232

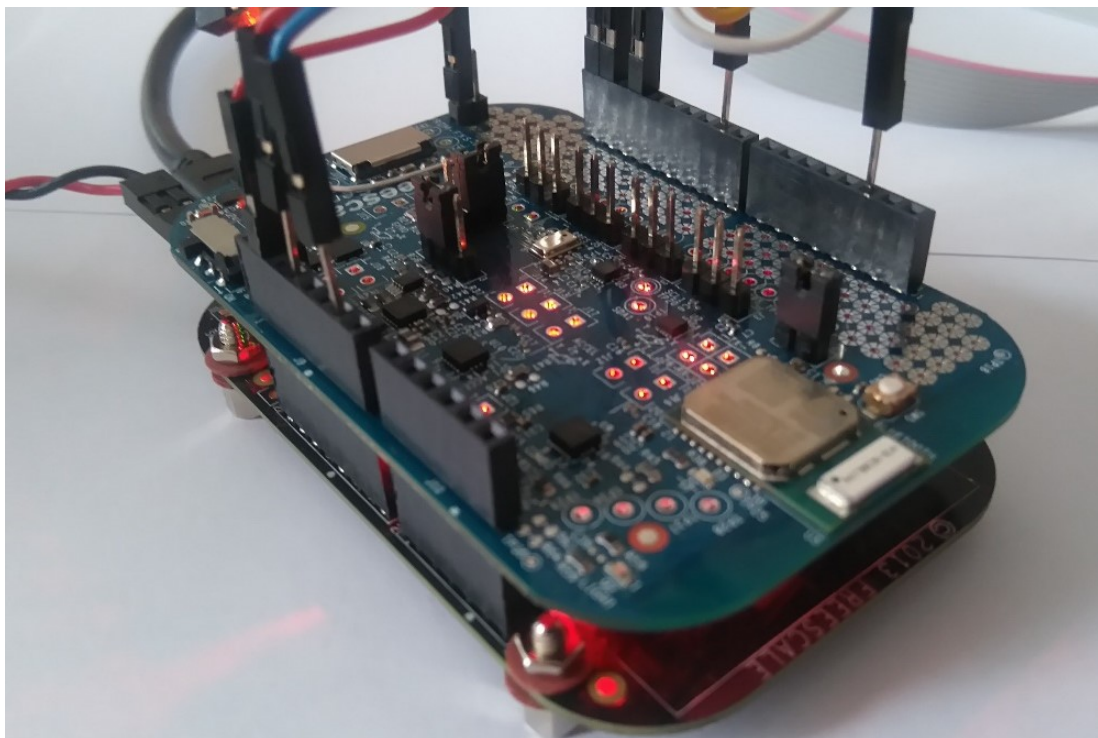
5.6 J-Link

Pro posílání a vizualizaci dat je připojena sonda firmy Segger, sloužící pro ladění. V měřicím řetězci je použita sonda J-Link EDU. Sonda je připojena z jedné strany přes USB k počítači a na druhé straně 20kanálovým kabelem s SWD konektorem k mikrokontroléru.

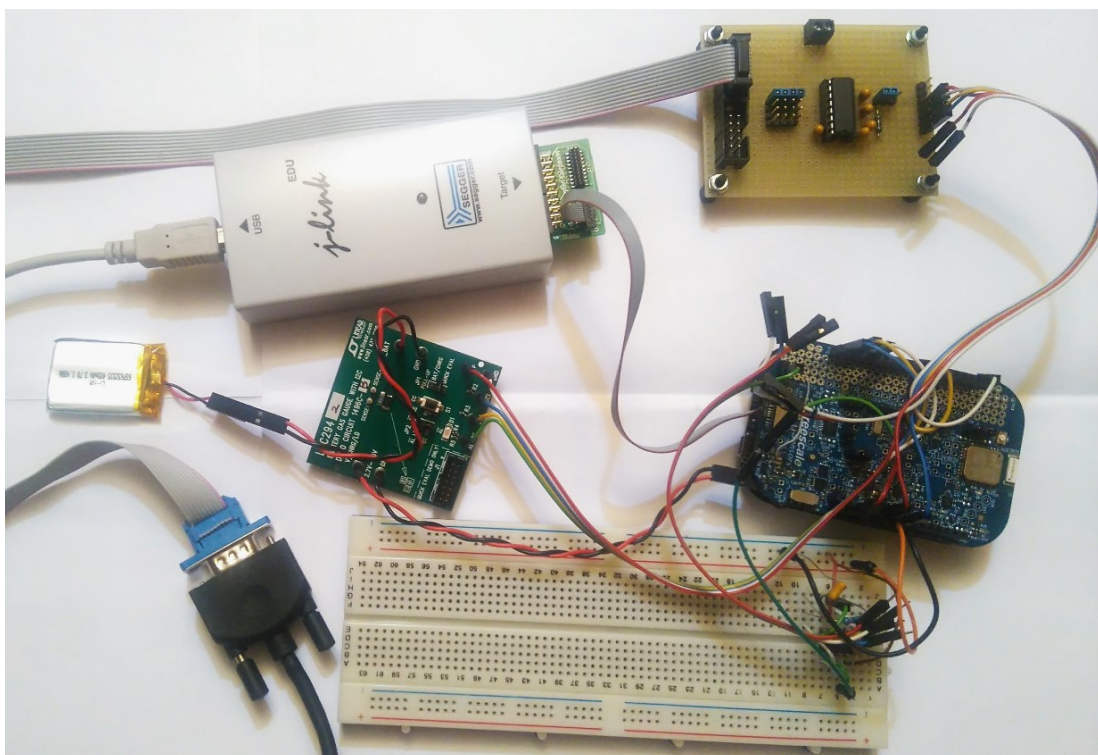


Obrázek 16: Ladící sonda J-Link EDU [25]

Data jsou vykreslena v programu J-Scope. Tento softwarový systém slouží pro vizualizaci dat různých typů J-Link ladících sond. Aplikace analyzuje a vizualizuje data na mikrokontroléru v reálném čase, zatímco je systém aktivní. Poskytuje kontinuální reprezentaci vzorků proměnných uložených ve vestavěném systému při dané vzorkovací frekvenci. Aby bylo možné vzorky zobrazit, je třeba mít dané proměnné v programu nastaveny jako globální, nejideálněji typu volatile (např. typ float není podporován).



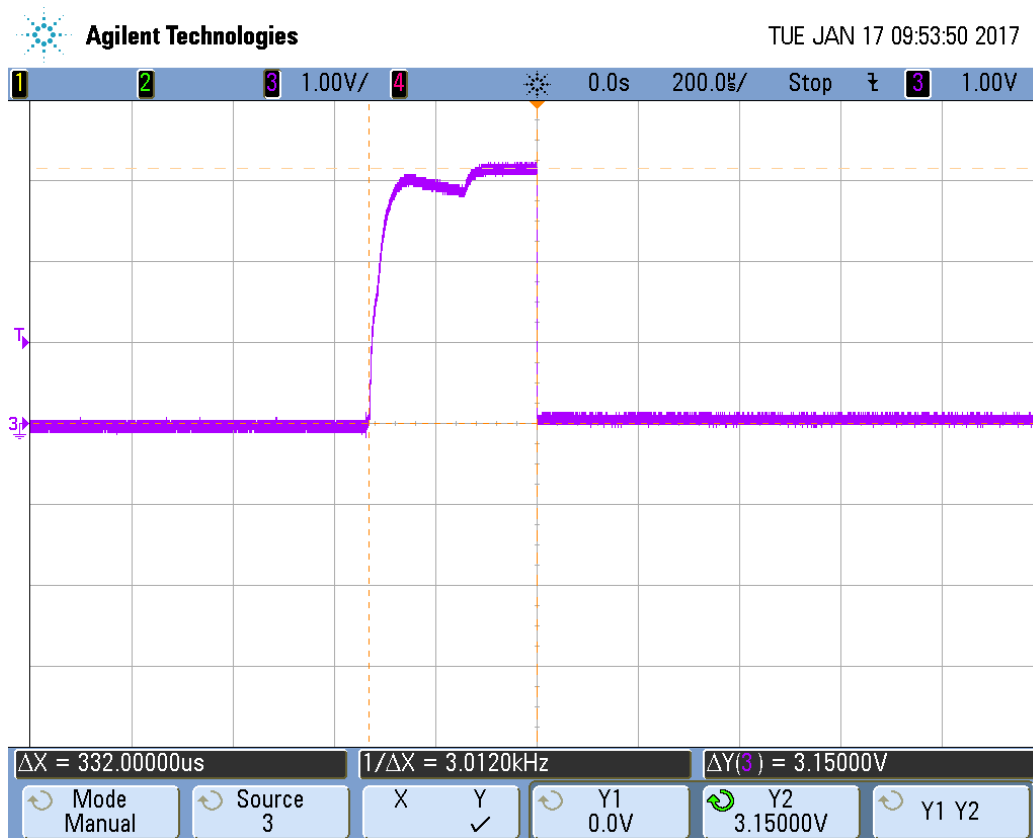
Obrázek 17: Propojení mikrokontroléru FRDM-KL25Z a multisenzorové desky FRDM-FXS-MULT2-B I/O piny



Obrázek 18: Měřicí řetězec zapojený z částí popsaných výše

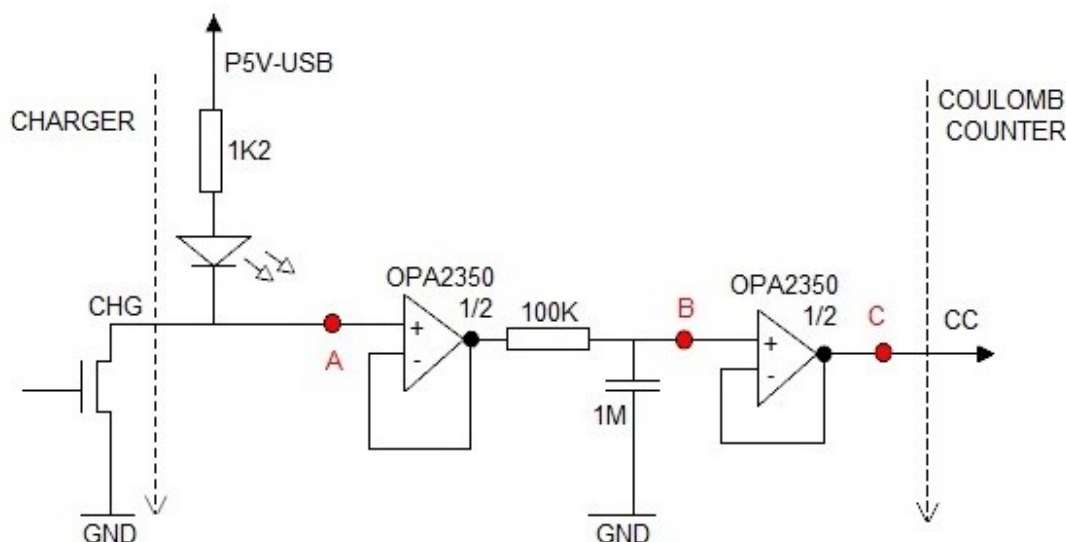
5.7 Úprava měřicího řetězce

V řetězci se objevily artefakty, které způsobovaly nesprávné chování realizovaného zapojení. Artefakty byly naměřeny na osciloskopu, měřením dané problematické větve. Oba technické problémy se vyskytovaly v případě spojení USB kanálu s řetězcem. V prvním případě se jednalo o nabíjecí větev. Docházelo k resetu „counteru“, tedy počítadla, které ukazuje stav nabití baterie. Při připojení USB došlo k resetu a poté naběhla automaticky hodnota maximálního nabití 0xFFFF, nehledě na to, kolik byla skutečná hodnota nabití baterie. Tento problém je demonstrován (Obrázek 19). Artefakt je zde zachycen měřicími kursory X1 a X2. Délka artefaktu je 332 μ s.



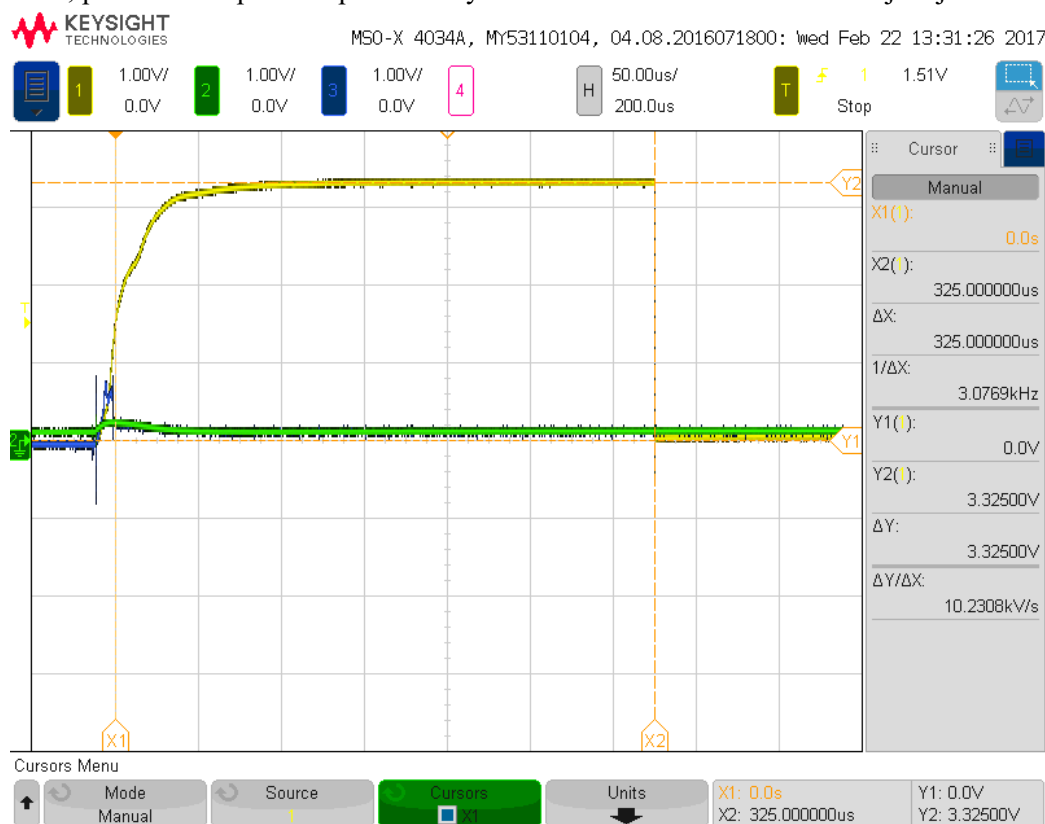
Obrázek 19: Artefakt v měřicím řetězci na nabíjecí větvi

Tento artefakt byl vyřešen zapojením filtru do nabíjecí větve mezi CHG (charger) a CC (Coulomb counter). Přípravě filtru předcházela delší proces. Prvním nápadem bylo odfiltrovat artefakt kondenzátorem. Ovšem v tomto případě došlo k pouhé změně tvaru artefaktu, bez žádného významnějšího zlepšení problému. Dalším nápadem byl jednoduchý filtr typu dolní propust, případně tento filtr doplnit o napěťový sledovač. Po nefunkčnosti těchto řešení byl zkonstruován filtr s dvěma napěťovými sledovači (Obrázek 20).



Obrázek 20: Realizovaný filtr s napěťovými sledovači

Níže lze vidět (Obrázek 21) naměřené křivky v jednotlivých bodech řetězce s připojeným filtrem. Bod A, odpovídající žluté křivce, znázorňuje artefakt ještě před průchodem realizovaným filtrem. Bod B, odpovídající modré křivce, znázorňuje artefakt po částečném průchodu filtrem. Poslední bod C, tedy zelená křivka, znázorňuje záznam nabíjecí větve po průchodu filtrem. Jak je tedy vidět na zelené křivce, použití filtru přineslo požadovaný účinek. Reset counteru už se neobjevuje.



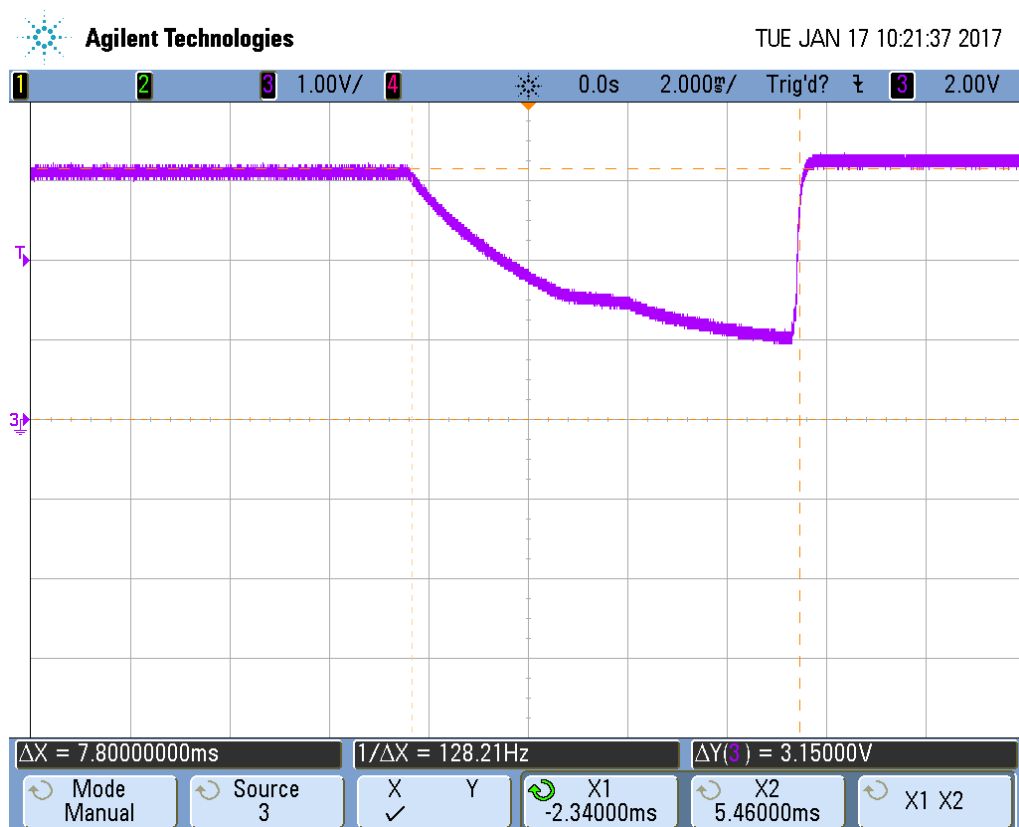
Obrázek 21: Artefakt po průchodu filtrem (zelená křivka) a ostatní křivky naměřené v jednotlivých bodech filtru

Níže je zobrazen moment (Obrázek 22), kdy v nabíjecí větvi dochází k dobíjení baterie do plného stavu. Modrá (artefakt po částečném průchodu filtrem) a zelená (po úplném průchodu filtrem) křivka se shodují při průchodu.



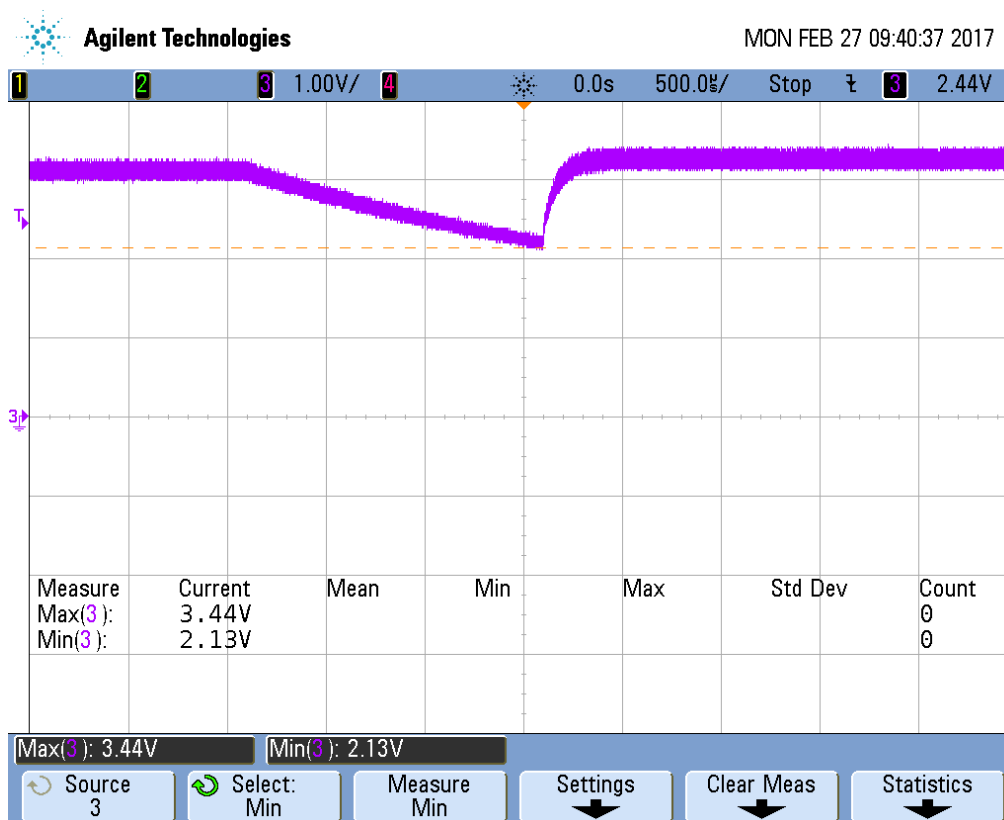
Obrázek 22: Grafické znázornění dobíjení baterie po zapojení filtru do měřicího řetězce

Dalším problémem byl technický artefakt týkající se přechodu napájení řetězce z USB portu počítače na baterii. Při přechodu z jednoho typu napájení na druhý, došlo k poklesu napětí přibližně z hodnoty 3 V na hodnotu 1 V. Poté se ustálilo, s určitou časovou prodlevou, na napětí cca 3,3 V (Obrázek 23). Kvůli tomuto problému docházelo k resetu měřicího cyklu, který se projevoval současně i bliknutím RGB diody mikrokontroléru. Toto bylo způsobeno v případě, kdy byl měřicí řetězec nabíjen z počítače. Po odpojení USB došlo k časové prodlevě, než začal být řetězec napájen z baterie.



Obrázek 23: Artefakt vzniklý při přechodu napájení z USB na napájení z baterie

Tento problém je způsoben špatnou realizací zapojení napájecího obvodu (Battery Regulation) rozšiřující multisenzorové desky FRDM-FXS-MULT2-B. V případě propojení multisenzorové desky s MCU FRDM-KL25Z přes pin P5V_USB, dojde k propojení tohoto pinu s obvodem Battery Regulation rozšiřující desky. Než začne být řetězec nabíjen z baterie, postupně se nabíjejí kondenzátory C42 = 10 μF a C43 = 2 μF v nabíjecím obvodu. Tento jev způsobí časovou prodlevu, a následkem toho dojde k poklesu napětí na hodnotu 1 V. Tuto dobu nabíjení kondenzátorů bylo potřeba zkrátit, aby byl zmíněný artefakt odstraněn či alespoň co nejvíce omezen. Proto se jako logické řešení jevílo odpojit některý z kondenzátorů, nejlépe s větší hodnotou. Po odpájení kondenzátoru C42 z větve P5V_USB ze sensorové desky došlo ke snížení časové prodlevy. Omezení bliknutí RGB diody je omezeno (Obrázek 24) a nedochází k žádným nežádoucím jevům (př. reset měřicího řetězce).



Obrázek 24: Vyřešený artefakt v napájecí větvi po odpájení kondenzátoru z devkitu

5.8 Softwarová realizace

Pro propojení a nastavení komunikace je použito integrované vývojové prostředí KDS – Kinetis Design Studio 3 IDE. Kinetis Design Studio je integrované vývojové prostředí, které slouží pro platformy Kinetis mikrokontrolérů. Umožňuje robustní editaci, kompilaci a ladění návrhů a zdrojových kódů. Pro lepší ladění zdrojového kódu Ozon debugger. Díky Ozonu je možno ladit jakékoliv vložené aplikace jazyka C. Ozon obsahuje všechny potřebné informace pro ladění Windows a využívá nejlepší provedení ladění J-Link sond.

Při psaní programu byla nastavena komunikace s registry Gas Gauge obvodu. Gas Gauge komunikuje s mikrokontrolérem přes I²C rozhraní. Proto byla nastavena adresa podřízeného uzlu, adresu potřebných registrů a další parametry jako „baud rate“ (tedy přenosová rychlost) či velikost přenášené informace (v bytech). Pro načítání dat přes sériovou linku je potřebné mít dostupný sériový terminál v počítači. Aplikace PuTTY bude použita pro obsluhu sériového portu a umožnění nastavení sériové komunikace (výběr sériového portu připojeného k převodníku, nastavení přenosové rychlosti, otevření/uzavření portu).

Mikrokontrolér je propojený pomocí vstupně-výstupních pinů s rozšiřující multisenzorovou deskou FRDM-FXS-MULT2-B. Monitorovací obvod baterie Gas Gauge LTC2942 je propojen s baterií a MCU KL25Z přes rozšiřující desku (jelikož MCU a deska je propojena).

Program je psán na FreeRTOS. Tento volně přístupný systém Open Source knihoven nabízí operační systém reálného času a standardně se používá pro mikrokontroléry a malé mikroprocesory. Systém je profesionálně vyvinutý za současné přísné kontroly jakosti. Je robustní, hojně podporován a zdarma k použití v komerčních produktech. FreeRTOS je dodáván ve formě zdrojového kódu, který

by měl být zahrnut do projektu aplikace. Při použití FreeRTOS jde o psaní kódu jako souboru nezávislých úkolů. To znamená, že hlavní funkcí `main()` se vytváří aplikační úloha – „task“ (neobsahuje tedy přímo funkčnost aplikace), a hlavní `main.c` a projektové soubory (`makefile` nebo ekvivalent) jsou součástí projektu. Program obsahuje několik knihoven, ze kterých jsou čerpány nastavení pro danou proměnnou, funkci apod. V projektu je hlavní zdrojový kód, hlavičkové soubory a knihovny, společně se soubory Open Source od FreeRTOS. Tyto soubory definují a charakterizují komunikační protokoly, informace o Gas Gauge LTC2942, akcelerometru, mikrokontroléru KL25Z, nastavení a definice konvoluce, hodinového signálu, UARTu, I²C, a další.

Pro definici komunikace I²C slouží `fsl_i2c.h` soubor (i2c driver). Výběr konkrétního I²C (I2C0 pro komunikaci s akcelerometrem a I2C1 pro komunikaci s Gas Gauge) a definice probíhá v souboru `MKL25Z4.h` a zdrojovém kódu `acc_gg.c`. Pro nastavení konkrétních parametrů I²C slouží funkce `iic_rdw`. Mezi parametry nastavované pro I²C patří: Směr toku dat, velikost dat a počet v bytech, adresa, příznak a další. Definice a nastavení komunikace UART je v souboru `MKL25Z4.h`. Konkrétní výběr daného UARTu, nastavení baud rate, děliček a další, je ve zdrojovém kódu `acc_gg.c`. Pro posílání dat přes toto rozhraní slouží funkce `uart_send` (definovaná pro oba použité UART kanály).

Ve funkci `SAMPLE_RATE` eval se nastavuje vzorkovací frekvence dle napětí baterie.

Funkce `task_meas` slouží k inicializaci komunikace I²C, UART, nastavení parametrů úlohy (task) semaforu, zpřístupnění portů pro blikání diod, povolení a zahájení komunikace s jednotlivými částmi měřicího řetězce. Na konci bloku vzorků probíhá čtení z měřicího řetězce. Tyto vzorky poté využívá funkce `task_prn`, kde probíhá odesílání do funkce řady (queue).

Funkce `task_prn` posílá data získaná z `task_meas` do počítače přes UART.

Fronty neboli queue, jsou primární formou mezitaskové komunikace. Mohou být použity k odesílání zpráv mezi úkoly navzájem a mezi přerušeními a úkoly. Ve většině případů se používají jako vlákna bezpečných FIFO (first in first out) zásobníků. Nová data se posílají na zadní stranu fronty a jsou postupně posílána dopředu (FIFO = první dovnitř, první ven).

Z důvodu lepší přehlednosti posílaných dat je užitečnější zobrazovat data přes J-Scope, protože je vidíme reálném čase. Také je toto řešení efektivnější pro úsporu energie (cca 0,2 mA). Ukládání dat přes UART je možno nastavit (debug 0 pro vypnuto, debug 1 pro zapnuto). Toto zjištění a nastavení je ověřeno testováním obou variant ukládání a zobrazování dat.

6 Návrh a implementace low-power měřicího cyklu včetně I²C komunikace.

Tato kapitola se zabývá návrhem a implementací měřicích cyklů. Obsahuje diagramy popisující základní principy měřicích cyklů a podrobněji je popisuje. Zabývá se testováním z hlediska spolehlivosti a spotřeby. Jednotlivé kapitoly popisují principy testování a nastavování parametrů. Z důvodu velkého množství grafů je v práci zobrazen pouze jeden graf pro každý test. Zbývající grafická znázornění jsou obsažena v Příloze I a Příloze II.

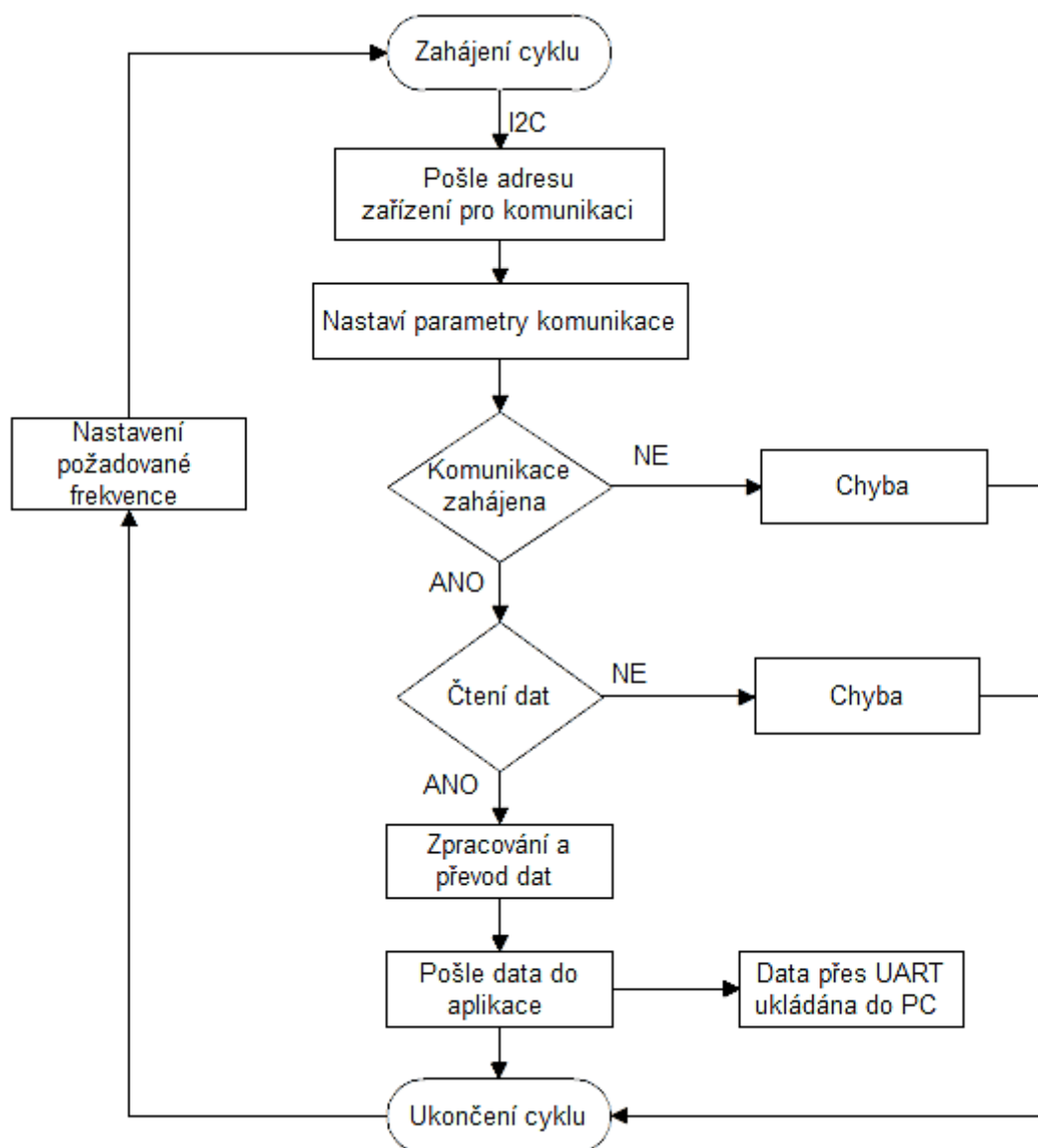
6.1 Návrh low-power měřicího cyklu

Plně funkční vzorek měří parametry skrz Gas Gauge obvod, který spojuje baterii a mikrokontrolér. Cílem této části je vytvořit měřicí cykly, které budou snímat kupříkladu napětí baterie, kapacitu nabití baterie, procenta baterie apod. Tyto informace jsou získány z registrů Gas Gauge obvodu. Toto samotné měření bude doplněno měřením referenčním. Například pro měření napětí baterie bude na danou větev připojen voltmetr, pro ověření správnosti údajů získaných z daného Gas Gauge registru. To stejné bude platit pro měření proudu (ampérmetr).

Data získaná z měření budou posílána po sériové lince nebo přes J-Scope a budou ukládána do souboru. Vzorkovací frekvence bude nastavena na stovky vzorků (přibližně 200–500 vzorků) za určitý časový interval (např. 2 hodiny). Zařízení by mělo mít tento daný počet vzorků v normálním režimu. V případě, že se baterie vybije na určitou mez (například 10 %, 30 %, 50 %), měřicí celek sníží frekvenci vzorkování dle nastavení. Tímto by mělo být dosaženo úsporného režimu a šetření energie, tedy využití low-power napájecího režimu.

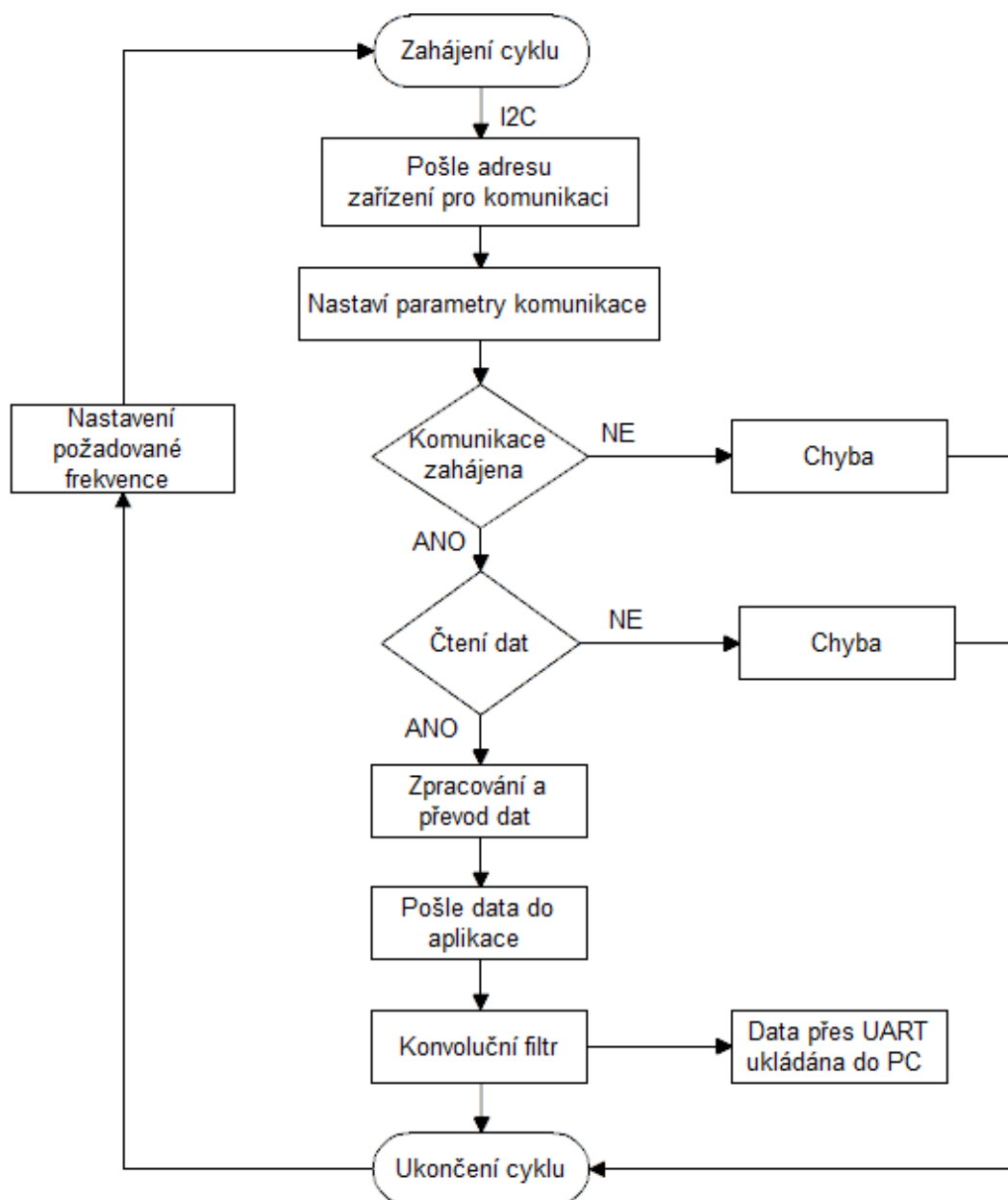
Jako zátěž pro testování měřicího řetězce je použit akcelerometr. Akcelerometr je součástí obou zařízení Freescale. Mikrokontrolér snímá hodnoty z akcelerometru a ty jsou společně s hodnotami z obvodu snímání baterie posílány a ukládány do počítače (popřípadě vykresleny v J-Scope). Z akcelerometru je snímána prostorová orientace zařízení v souřadnicovém systému XYZ (osa x, osa y, osa z). Dále také pro zvýšení využití procesoru MCU a většího pracovního zatížení měřicího cyklu bude do procesu přidán filtr. Tento filtr slouží pro testování vlivu spotřeby měřicího řetězce při zvýšení zatížení měřicího procesu.

Při zapnutí mikrokontroléru se inicializuje komunikace s částmi měřicího řetězce (Gas Gauge a akcelerometr). V případě monitorovacího obvodu baterie jde o komunikaci I²C. Program je spuštěn, pošle se zahajovací balík dat, který zapíše adresu podřízeného zařízení, hodnotu prescaleru, hodnotu kontrolního registru. Při úspěšném zapsání těchto dat podřízenému uzlu uzlem řídícím, dojde k potvrzení a nastavení daných parametrů. Poté začne řídící uzel číst informace z vybraných registrů, které jsou podrobněji popsány v Tabulka 4: Mapa registrů Gas Gauge obvodu LTC2942. Tato data jsou potom převedena, jelikož registry jsou 16bitové, tudíž je jejich maximální hodnota 65535. Proto je nutné hodnotu napětí baterie přepočítat na užitečnou hodnotu (v případě napětí na volty apod.). Tyto údaje jsou pak posílány přes UART nebo J-Scope do počítače a ukládány do souboru. Po načtení vzorku proběhne celý cyklus znovu. Data jsou periodicky posílána s určitou frekvencí, kterou je možno nastavit.



Obrázek 25 Diagram komunikace mezi mikrokontrolérem a monitorovacím obvodem baterie pro získání dat

Při zapnutí mikrokontroléru se inicializuje komunikace s částmi měřicího řetězce (Gas Gauge a akcelerometr). V případě měření polohy akcelerometru jde o komunikaci I²C. Program je spuštěn, pošle se zahajovací balík dat, který zapíše adresu podřízeného zařízení a inicializaci akcelerometru dle datasheetu Who Am I. Při úspěšném zapsání těchto dat podřízenému uzlu řídícím uzlem, dojde k potvrzení a nastavení daných parametrů. Poté začne řídící uzel číst informace z vybraných registrů dle datasheetu. Z akcelerometru jsou načtena data ohledně orientace zařízení v prostoru v souřadnicovém systému XYZ. Tato data jsou potom převedena, jelikož registry jsou 16bitové. Data jsou načtena do konvoluce a zpracována. Data vypsána před i po zpracování konvolučním filtrem mohou být posílána přes UART do počítače a ukládána do souboru či vykreslována v J-Scope softwaru. Po načtení vzorku proběhne celý cyklus znovu. Data jsou periodicky posílána s určitou frekvencí, kterou je nastaveno dle možností frekvenčního rozsahu akcelerometru.



Obrázek 26: Diagram komunikace mezi mikrokontrolérem a akcelerometrem pro získání dat

6.1.1 Konkrétní návrhy pro řešení low-power

Cílem měřicích cyklů je měřit napájecí napětí Gas Gauge obvodu (voltage register) a stav kapacity baterie (accumulated charge register). Měření parametrů akcelerometru bude probíhat s proměnlivou frekvencí v rámci možností akcelerometru pro frekvenční spektrum definované v datasheetu zařízení.

- **Měření napájecího napětí** – voltage Gas Gauge (s pevnou periodou)
- **Měření nabití baterie** – charge Gas Gauge (s pevnou periodou)
- **Měření na 3D akcelerometru** (za současné simulace výpočetních operací/ řízení dat – např. použitím filtru, konvoluce, apod....)

Vstupními parametry (perioda měření, a další) je výstupem z měření charge a voltage gas gauge.

- Odesílání stavových informací Gas Gauge
- Odesílání výsledku měření z akcelerometru

6.2 Testování řešení z hlediska spotřeby a spolehlivosti

V případě spolehlivosti je nutné brát v úvahu nabíjecí a vybíjecí charakteristiku baterie, definovanou již dříve v kapitole 0. V případě odpojení baterie z měřicího řetězce není monitorovacímu obvodu Gas Gauge znám poslední stav napětí baterie. Proto se dle charakteristiky v datasheetu nastaví charge registr (kapacita baterie) na hexadecimální hodnotu 7FFF (32767), tedy polovinu hodnoty 16bitového registru. Proto je pro testování nutné baterii nechat nabít do plného stavu, kdy dojde k synchronizaci, a poté provádět měření. Tento proces je nutný a dle mého zkoumání v praxi běžný (kupříkladu mobilní telefony a jiná přenosná zařízení, vestavěné systémy, ...). Aby se tento fakt eliminoval, muselo by dojít pravděpodobně k použití jiného monitorovacího obvodu.

Spolehlivost měření

Měření se považuje za spolehlivé v případě, jestliže se při jeho opakování za stejných podmínek a použití stejné měřicí techniky, výsledky měření shodují. Pro co největší spolehlivost měření, by měl být proces co nejméně ovlivněn náhodnými faktory, a proto existuje nepřímá závislost mezi spolehlivostí měření a náhodnými chybami měření. V tomto případě lze říci, že je toto měření spolehlivé. Všechny testy popsané a graficky zpracované v realizační části práce byly provedeny minimálně třikrát. Pro ověření správnosti naměřených výsledků se provádělo referenční měření napětí (např. voltmetrem měření baterie před a po testu).

Spolehlivost v nastavení měřicích cyklů vyplývá ze skutečnosti, že nastavené parametry jsou reálně přítomny a fungují dle požadavků při měření. Spolehlivost ve funkčnosti měřicího řetězce jako takového spočívá v předpokladu, že všechny jeho součásti fungují bezchybně a správně. Může docházet k vzájemné špatné komunikaci mezi MCU a Gas Gauge obvodem, MCU a akcelerometrem apod.

Řešení spotřeby

Z hlediska řešení spotřeby byly vypnuty všechny nepotřebné funkce, které nejsou používány v zapojení a nejsou pro měření potřebné. Došlo k vypnutí RGB diod, Bluetooth a OpenSDA. Došlo také ke snížení frekvenci mikrokontroléru ze 48 MHz na 8 MHz. Podrobněji jsou testy spotřeby popsány v kapitole 6.2.1.

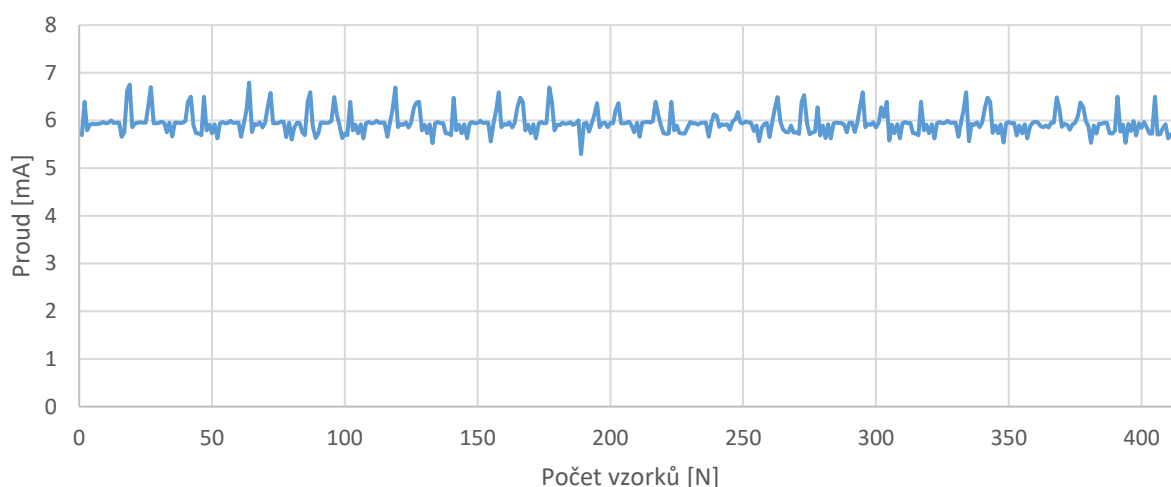
6.2.1 Test spotřeby

Test spotřeby byl měřen při každém testování. Výsledky zobrazené v grafech jsou průměrné hodnoty z testů se stejnými parametry. Na spotřebu energie má vliv mnoho faktorů. Zapojení měřicího řetězce a jeho následné úpravy jsou popsány v odstavcích níže.

Původní zapojení lze vidět na blokovém schématu na Obrázek 10. Toto zapojení mělo průměrnou spotřebu 35, 56 mA a nastaveny byly tyto parametry: svítící RGB diody, zapnuté Bluetooth na FRDM-FXS-MULT2-B, frekvence FRDM-KL25Z 48 MHz a zapojené rozhraní OpenSDA. Graf spotřeby tohoto zapojení lze nalézt v Příloze I (Graf 1). Pro úpravy spotřeby řetězce byly vypnuty diody a spotřeba se snížila z cca 34,56 mA na 30 mA. Následně došlo k vypnutí Bluetooth rozhraní na FRDM-FXS-MULT2-B a spotřeba se snížila o přibližně 4 mA. Spotřeba se tedy pohybovala okolo 25,5-26 mA. Graf spotřeby tohoto zapojení lze nalézt v Příloze I (Graf 2). Nejvýznamnější vliv na spotřebu zařízení měla změna frekvence mikrokontroléru, a to z hodnoty 48 MHz na 8 MHz. Po této úpravě došlo k poklesu až na přibližnou hodnotu 11 mA. Graf spotřeby tohoto zapojení lze nalézt v Příloze I (Graf

3). Poslední významnou redukcí bylo odpojení rozhraní OpenSDA pro debuggování, které změnilo hodnotu spotřeby na 5,9 mA. Co se týče procesorového zaměstnání, kdy se jedná o konvoluci (zpracování dat posílaných z akcelerometru konvolučním filtrem), navýšená spotřeba se pohybovala okolo 0,2 mA. Stejná situace nastala při vypnutí UART rozhraní, přes které mohou být také posílána data. Rovněž při změnách frekvence posílání dat z akcelerometru je rozdíl spotřeby cca 0,25 mA (rozdíl mezi frekvencemi vyššími jako $F_{vz} = \{100 \text{ Hz}, 200 \text{ Hz}\}$ a nižšími $F_{vz} = \{1.56 \text{ Hz}, 6.25 \text{ Hz a } 12.50 \text{ Hz}\}$). Výsledný měřicí řetězec tedy pracuje s frekvencí mikrokontroléru 8 MHz, využívá konvolučního filtru, frekvence čtení dat z akcelerometru je proměnná dle stavu nabití baterie, má vypnuté diody, vypnuté Bluetooth a odpojené OpenSDA rozhraní.

V Graf 1 je k vidění grafické znázornění spotřeby s průměrnou hodnotou 5,9267 mA. Tato hodnota je spotřebou aktuálního měřicího řetězce se všemi výše zmiňovanými úpravami (poslední varianta měřicího řetězce).



Graf 1: Naměřená průměrná spotřeba výsledného měřicího řetězce (s vypnutým Bluetooth, frekvencí mikrokontroléru 8 MHz, odpojeným OpenSDA)

Ostatní grafická zpracování spotřeb měřicího řetězce v různých fázích práce jsou k naleznutí v Příloze I.

6.2.2 Testování z hlediska spolehlivosti

Získaná doplňující data při měření jsou uložena v textových a .csv souborech. Dle těchto dat byly vykresleny následující grafy. Graf kapacity baterie odpovídá dle registru `acc_chrg`. Napětí baterie odpovídá dle registru `voltage` a referenční hodnota ve voltech je měřena na začátku a konci každého testu voltmetrem. Procentuální hodnota je odečítána pomocí přepočtu z kapacity baterie z registru obvodu Gas Gauge.

Pro potřeby testování a lepší přehled zobrazovaných hodnot byly zvoleny pro vzorkovací frekvence symbolické hodnoty.

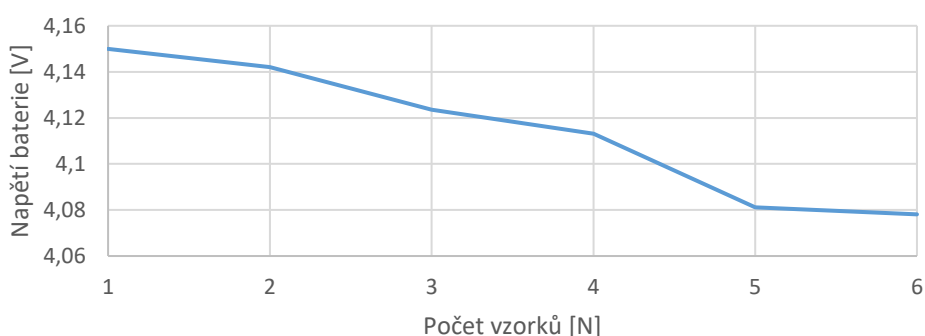
Počet vzorků [N] v grafech na osách x značí počet vzorků, které byly poslány z měřicího řetězce do počítače a následně uloženy s určitou vzorkovací frekvencí a v daném časovém intervalu. Například při testu, který trval 25 minut a jeho vzorkovací frekvence byla 100 Hz, bylo posláno měřicím celkem 71000 vzorků.

Tabulka 5: Zvolené symbolické proměnné pro frekvenci

Skutečná vzorkovací frekvence [Hz]	Zvolená symbolická hodnota [-]
200	1
100	2
50	3
12,50	4
6,25	5
1,56	6

Test 1.

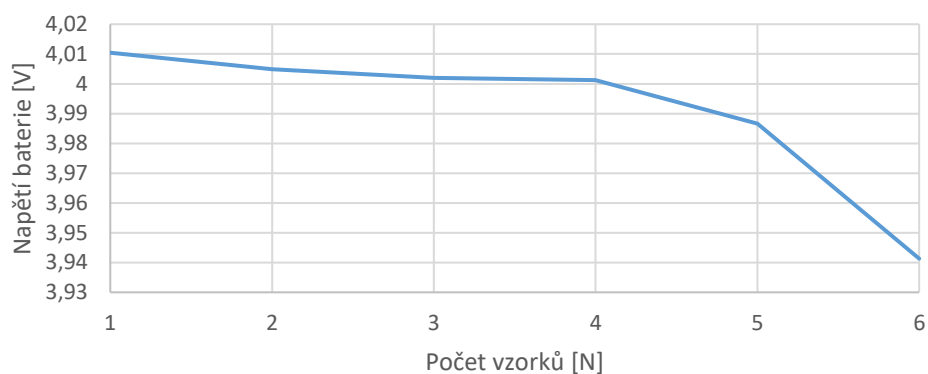
Test probíhal při původním zapojení řetězce bez úprav spotřeby řetězce. Spotřeba se pohybovala okolo 35 mA. Data z akcelerometru jsou měřena s frekvencí 200 Hz. Stavové informace ohledně kapacity a napětí baterie a procentuální hodnoty jsou posílány pouze při změně napětí baterie (tedy přibližně jeden vzorek za 5 minut, což odpovídá snížení kapacity o 1 % za 5 minut). Diody byly při testu zapnuté, Bluetooth zapnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz. Čas testu 25 minut. V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.



Graf 2: Napětí baterie v průběhu Testu 1. se zapojením měřícího řetězce bez úprav (data posílána pouze při změně)

Test 2.

Test probíhal s jednou úpravou měřícího řetězce. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth zapnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz. Spotřeba se pohybovala okolo 30 mA. Data z akcelerometru jsou měřena s frekvencí 200 Hz. Stavové informace ohledně kapacity a napětí baterie a procentuální hodnoty jsou posílány pouze při změně napětí baterie (tedy přibližně jeden vzorek za 6,25 minut, což odpovídá snížení kapacity o 1 %). Čas testu 25 minut. V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.



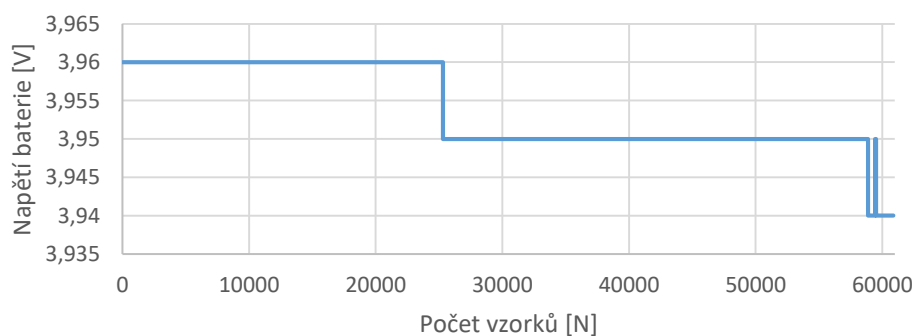
Graf 3: Napětí baterie v průběhu Testu 2. s vypnutými diodami (data posílána pouze při změně)

Test 3.

Test probíhal při zapojení řetězce s úpravami, díky kterým se spotřeba pohybovala okolo 25,965 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla snížena na hodnotu 8 MHz. Počet vzorků měření je $N=60888$. Čas testu přibližně 20 minut. Data z akcelerometru jsou měřena s níže vybranou vzorkovací frekvencí. Tato frekvence je v každém cyklu vybrána dle aktuálního stavu kapacity baterie, aby došlo k šetření energie baterie a měření trvalo co nejdelší dobu.

Tabulka 6: Výběr vzorkovací frekvence pro měřicí cyklus dle aktuální hodnoty napětí baterie

Hodnota nabití baterie [%]	Fvz [Hz]
> 50	200
< 50	100
< 40	50
< 20	12.50
< 10	1.56



Graf 4: Napětí baterie v průběhu Testu 3. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvenci mikrokontroléru 8 MHz

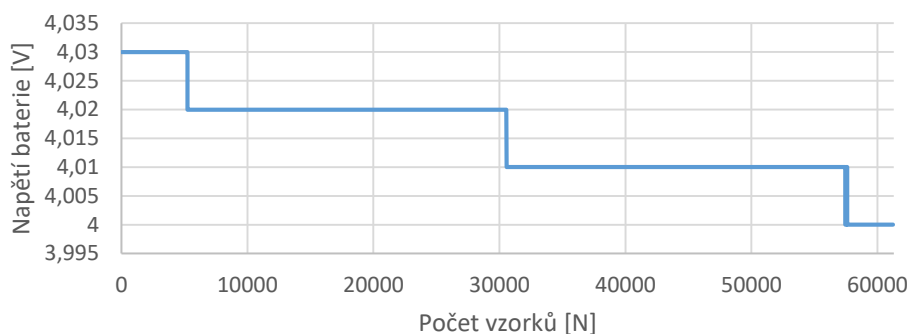
V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 4.

Test probíhal při zapojení řetězce s úpravami, díky kterým se spotřeba pohybovala okolo 25,965 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz. Počet vzorků měření je $N=61245$. Čas testu přibližně 20 minut. Data z akcelerometru jsou měřena s níže vybranou vzorkovací frekvencí. Tato frekvence je v každém cyklu vybrána dle aktuálního stavu kapacity baterie, aby došlo k šetření energie baterie a měření trvalo co nejdelší dobu.

Tabulka 7: Výběr vzorkovací frekvence pro měřicí cyklus dle napětí baterie

Hodnota nabití baterie [%]	Fvz [Hz]
> 89	100
< 89	50
< 88	12.50
< 10	1.56

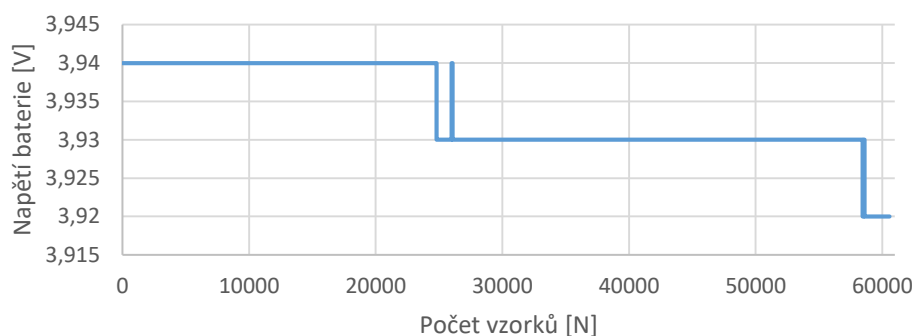


Graf 5: Napětí baterie v průběhu Testu 4. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 5.

Test probíhal při zapojení řetězce s odpojeným Bluetooth rozhraní a vypnutými diodami. Spotřeba se pohybovala okolo 25,965 mA. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz. Počet vzorků měření je $N=60582$. Čas testu přibližně 20 minut. Data z akcelerometru jsou měřena pevně vybranou vzorkovací frekvencí $F_{vz}=100$ Hz. Tato frekvence je v každém cyklu stejná.



Graf 6: Napětí baterie v průběhu Testu 5. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvenci mikrokontroléru 48 MHz a $F_{vz}=100$ Hz

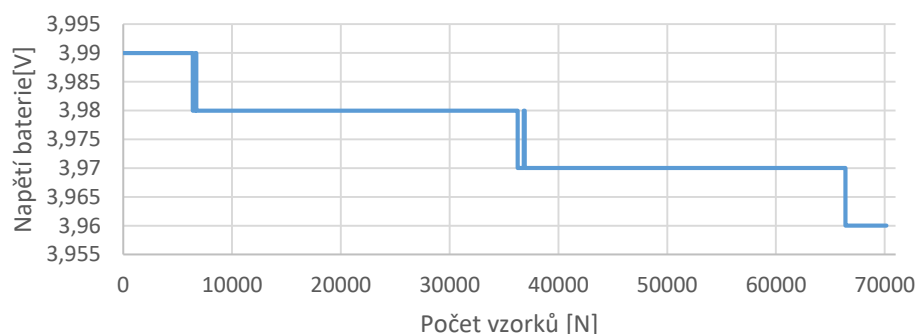
V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 6.

Test probíhal při zapojení řetězce s úpravami, díky kterým se spotřeba pohybovala okolo 25,965 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz. Počet vzorků měření je $N=70141$. Čas testu přibližně 23 minut. Data z akcelerometru jsou měřena s níže vybranou vzorkovací frekvencí. Tato frekvence je v každém cyklu vybrána dle aktuálního stavu kapacity baterie, aby došlo k šetření energie baterie a měření trvalo co nejdelší dobu.

Tabulka 8: Pro měření tohoto testu byl nastaven měřicí cyklus frekvence dle hodnoty nabití baterie

Hodnota nabití baterie [%]	F_{vz} [Hz]
> 50	200
< 50	100
< 40	50
< 20	12,50
< 10	1,56

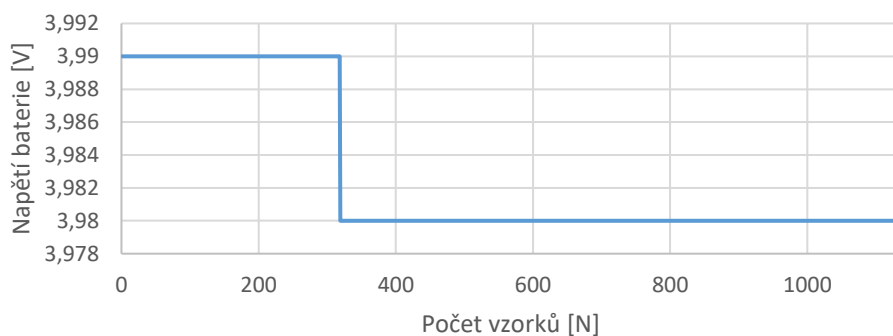


Graf 7: Napětí baterie v průběhu Testu 6. s vypnutými diodami a vypnutým Bluetooth a frekvenci mikrokontroléru 48 MHz a $F_{vz}=100$ Hz

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 7.

Byl proveden krátký test pro vzorkovací frekvenci $F_{vz}=6,25$ Hz. Počet vzorků je $N=1135$. Přibližný čas měření je přibližně 5 minut. Spotřeba se pohybovala okolo 11 mA. Diody byly při testu vypnuty, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 48 MHz.

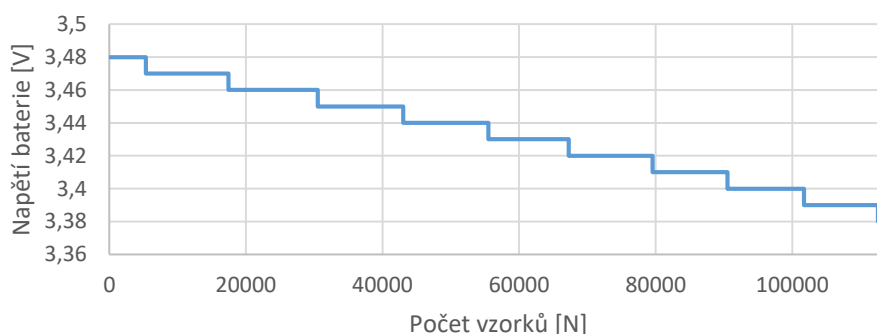


Graf 8: Napětí baterie v průběhu Testu 7. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=6,25$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 48 MHz

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 8.

Test probíhal při zapojení řetězce s úpravami, díky kterým se spotřeba pohybovala okolo 5,9 mA. Diody byly při testu vypnuty, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na hodnotě 8 MHz a došlo k odpojení OpenSDA. Počet vzorků měření je $N=113343$. Čas testu byl přibližně 30 minut. Data z akcelerometru jsou měřena pevně vybranou vzorkovací frekvencí $F_{vz}=50$ Hz. Tato frekvence je v každém cyklu stejná.

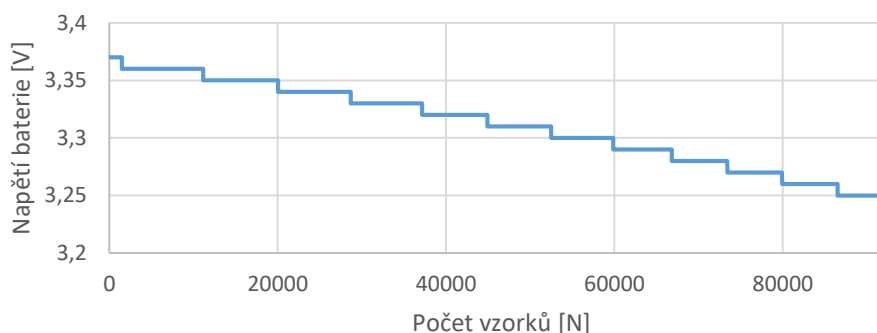


Graf 9: Napětí baterie v průběhu Testu 8. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=50$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz a odpojeným OpenSDA

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 9.

Test probíhal při zapojení řetězce s úpravami, díky kterým se spotřeba pohybovala okolo 5,9 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na hodnotě 8 MHz a došlo k odpojení OpenSDA. Počet vzorků měření je $N=92468$. Čas testu byl přibližně 30 minut. Data z akcelerometru jsou měřena pevně vybranou vzorkovací frekvencí $F_{vz}=200$ Hz. Tato frekvence je v každém cyklu stejná.

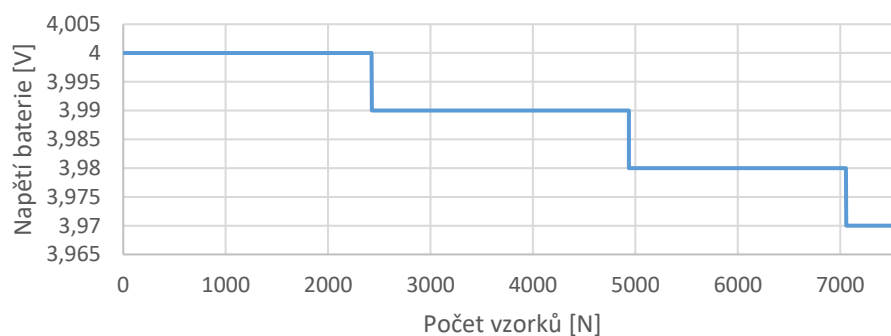


Graf 10: Napětí baterie v průběhu Testu 9. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=200$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, frekvencí mikrokontroléru 8 MHz a odpojeným OpenSDA

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 10.

Byl proveden test pro vzorkovací frekvenci $F_{vz}= 1,56$ Hz. Počet vzorků je $N= 7581$. Přibližný čas měření je přibližně 10 minut. Spotřeba se pohybovala okolo 11 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 8 MHz.

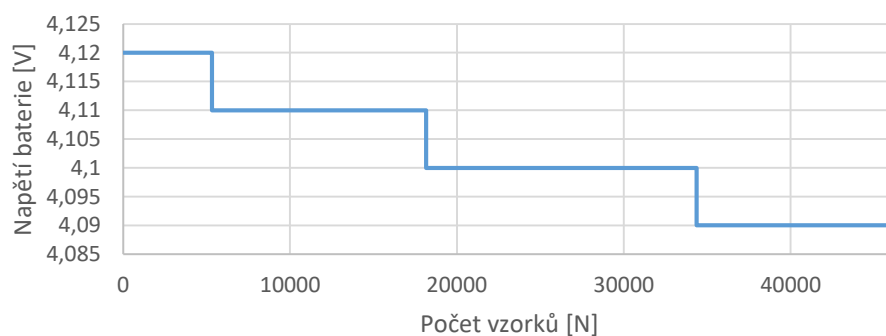


Graf 11: Napětí baterie v průběhu Testu 10. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=1,56$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Test 11.

Byl proveden test pro vzorkovací frekvenci $F_{vz}=12,50$ Hz. Počet vzorků je $N=45713$. Přibližný čas měření je přibližně 20 minut. Spotřeba se pohybovala okolo 11 mA. Diody byly při testu vypnuté, Bluetooth taktéž vypnuto. Frekvence mikrokontroléru byla na původní hodnotě 8 MHz.

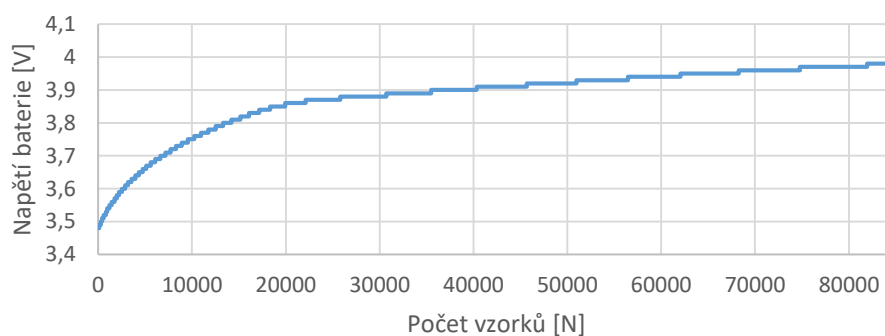


Graf 12: Napětí baterie v průběhu Testu 11. s vzorkovací frekvencí $F_{vz}=12,50$ Hz, vypnutými diodami a Bluetooth, a frekvencí mikrokontroléru 8 MHz

Test 12.

V tomto testu je vidět nabíjecí cyklus baterie. Výsledné grafické zobrazení odpovídá nabíjecí charakteristice Li-Iontové baterie dle kapitoly 0.

Test probíhal při zapojení řetězce s odpojeným Bluetooth rozhraní a diody byly při testu vypnuté. Frekvence mikrokontroléru byla na snížené hodnotě 8 MHz. Počet vzorků měření je $N=84303$. Čas testu je přibližně 35 minut.



Graf 13: Napětí baterie při nabíjecím cyklu

V příloze II lze nalézt další grafické podklady týkající se tohoto testu.

Na spotřebu zařízení, napětí baterie a kapacitu baterie měly vliv tyto parametry: nastavení RGB diod, nastavení Bluetooth, Frekvence mikrokontroléru, vypnutí OpenSDA a vzorkovací frekvence snímání dat z akcelerometru.

7 Závěr

Diplomová práce je dělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část práce zkoumá technologie pro konstrukci zařízení. Cílem práce bylo vytvořit návrh zařízení a sestavit funkční vzorek tohoto návrhu. Vytvořené zařízení pracuje v low-power režimu. Byly navrženy a realizovány měřicí cykly, podpořené referenčním měřením pro ověření správnosti. Pomocí těchto úkolů bylo docíleno co nejefektivnějšího nastavení režimu sběru, ukládání, úspory a využívání energie.

V první části práce je popsán teoreticky měřicí řetězec a jeho konstrukce. Low-power systém se ve většině případů skládá z mikrokontroléru, paměti elektronické a operační, sběrnice a periférií. Sběrnice slouží k propojení jednotlivých funkčních částí a sběru informací. Periferie zahrnují kupříkladu časovače, čítače a PWM generátory. Součástí jsou nepostradatelné komunikační rozhraní, především I²C a UART, SPI, RS232 a další. Navazující kapitoly v práci popisují možnosti napájecích zdrojů. Napájecí zdroje mohou být dvojího typu, primární a sekundární. Primární články není možné opakovaně nabíjet. Opakem jsou sekundární, které je možno opakovaně dobíjet. V této části práce byl proveden průzkum jednotlivých typů baterií. Posléze byla vybrána Li-Ionová baterie pro realizaci práce. Třetím bodem teoretické části je rešerše metod a strategií low-power napájení. Zde je řešeno řízení spotřeby elektrické energie. Při nižším napětí dochází ke snížení celkové spotřeby. Systém Low-power je sice ekonomicky méně výhodnější z hlediska pořizovacích nákladů, ale důležitým faktem je, že přenosné nebo mobilní systémy vydrží mnohem déle fungovat v provozu při stávající technologii baterií. Součástí rešerše byl průzkum trhu týkající se tohoto typu napájení.

Součástí práce bylo navrhnout vlastní řešení funkčního vzorku zařízení a tento návrh realizovat. Měřicí řetězec se skládá z mikrokontroléru firmy Freescale FRDM-KL25Z, rozšiřující multisenzorové desky FRDM-FXS-MULT2-B, převodníku logických úrovní TTL/RS232, baterie Li-Ion, Gas Gauge monitorovacího obvodu baterie LTC2642 a ladící sondy J-Link EDU. Po zapojení měřicího řetězce byla realizována komunikace mezi jeho jednotlivými částmi a dále byly vytvořeny měřicí cykly. V počátcích testování byly zjištěny dva artefakty v měřicím řetězci. První artefakt způsoboval reset počítače baterie a byl vyřešen konstrukcí filtru s napěťovým sledovačem. Druhý artefakt se týkal přechodu napájení řetězce z USB portu počítače na baterii, kdy došlo k poklesu napětí z přibližně 3 V na 1 V a následnému resetu měřicího řetězce. Artefakt byl vyřešen odpájením kondenzátoru z devkitu. Data z měření jsou ukládána přes rozhraní UART nebo pomocí vizualizačního softwaru J-Scope přes ladící sondu do souboru. Výsledky měření jsou poté vykresleny do grafů v Excelu.

V poslední části práce bylo otestováno vytvořené zařízení z hlediska spotřeby a spolehlivosti. Z hlediska řešení spotřeby došlo k vypnutí všech nepotřebných funkcí, které nejsou používány v zapojení a nejsou pro měření potřebné. Došlo k vypnutí RGB diod, Bluetooth a OpenSDA. Následovně byla snížena frekvence mikrokontroléru ze 48 MHz na 8 MHz. Vytvořený výsledný low-power měřicí řetězec má průměrnou spotřebu 5,9267 mA. V případě vytvořeného zařízení lze říci, že je toto měření spolehlivé. Všechny testy popsané a graficky zpracované v realizační části práce byly provedeny minimálně třikrát. Pro ověření správnosti naměřených výsledků bylo prováděno referenční měření (voltmetrem, ampérmetrem). Práce má univerzální využití, může sloužit pro napájení mnoha typů přenosných zařízení.

8 Použité zdroje

- [1] PRAUZEK, Michal. *ČÍSLICOVÁ A MIKROPROCESOROVÁ TECHNIKA: učební text a návody do cvičení ČÁST DRUHÁ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~pra132/files/CMT_prauzek_final_1_2.pdf
- [2] PRAUZEK, Michal. MIKROPROCESOROVÁ A ŘÍDICÍ TECHNIKA. [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~pra132/files/MRT_prednasky_2015_2016.pdf
- [3] Microcontroller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>
- [4] Universal asynchronous receiver/transmitter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver/transmitter
- [5] Intelligent Energy Management for Environmental Monitoring Systems. MUSÍLEK, Petr, Michal PRAUZEK, Pavel KROMER a James RODWAY. *SMART SENSORS NETWORKS: COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND INTELLIGENT APPLICATIONS*. 2017 [cit. 2017-01-18].
- [6] ŠALOUN, Petr. *Programovací jazyk C: Určeno pro posl. 3. roč. FEI*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-7078-256-0.
- [7] HRBÁČEK, Jiří. *Komunikace mikrokontroléru s okolím*. 1. díl. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-42-2.
- [8] PC. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- [9] Nickel–cadmium battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery
- [10] Supercapacitor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [11] LTC2942 - Battery Gas Gauge with Temperature, Voltage Measurement. *Linear Technology* [online]. Milpitas, CA 95035-7417: © 2016 Linear Technology, 2016 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.linear.com/product/LTC2942>
- [12] NEDELKOVSKI, Dejan. How I2C Communication Works and How To Use It with Arduino. In: *YouTube* [online]. San Bruno, CA 94066: YouTube, 2005 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6IAkYpmA1DQ>
- [13] FRDM-FXS-MULT2-B: FRDM-FXS-MULT2-B: Freedom Development Platform for NXP® Sensors with Bluetooth. *NXP Semiconductors* [online]. The Netherlands: ©2006-2017 NXP Semiconductors, 2017 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/frdm-fxs-mult2-b-freedom-development-platform-for-nxp-sensors-with-bluetooth.:FRDM-FXS-MULT2-B?fsrch=1&sr=3&pageNum=1>
- [14] FRDM-KL25Z: Freedom Development Platform for Kinetis® KL14, KL15, KL24, KL25 MCUs. *NXP Semiconductors* [online]. ©2006-2017 NXP Semiconductors, 2017 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-kl14-kl15-kl24-kl25-mcus:FRDM-KL25Z?tid=vanFRDM-KL25Z>

- [15] MURALI, Keshava. Low Power Techniques. In: *SlideShare* [online]. LinkedIn Corporation © 2017, 2009 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/shavakmm/lowpowerseminar810>
- [16] Synopsys [online]. Mountain View, CA 94043: ©2017 Synopsys, 2017 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <https://www.synopsys.com/company/contact-synopsys/office-locations.html>
- [17] D. Smith and J. Close, "Analog and Power Management Techniques," *2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*, San Francisco, CA, USA, 2007, pp. 516-517. doi: 10.1109/ISSCC.2007.373521/
- [18] P. M. Kogge, A. Rodrigues, J. Namkung, N. Aranki, N. B. Toomarian and K. Ghose, "A comparative analysis of power and energy management techniques in real embedded applications," *Innovative Architecture for Future Generation High-Performance Processors and Systems*, 2003, 2003, pp. 2-10. doi: 10.1109/IWIA.2003.1262777
- [19] M. Horowitz, T. Indermaur and R. Gonzalez, "Low-power digital design," *Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Low Power Electronics*, San Diego, CA, USA, 1994, pp. 8-11. doi: 10.1109/LPE.1994.573184
- [20] E. Dallago, A. Danioni, M. Marchesi and G. Venchi, "An Autonomous Power Supply System Supporting Low-Power Wireless Sensors," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 10, pp. 4272-4280, Oct. 2012. doi: 10.1109/TPEL.2012.2190525
- [21] IGARASHI, Mutsunori, Masahiro KANAZAWA, Shinji SONODA, et al. A low-power design method using multiple supply voltages. In: *Proceedings of the 1997 international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '97* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 1997, s. 36-41 [cit. 2017-01-08]. DOI: 10.1145/263272.263279. ISBN 0897919033. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=263272.263279>
- [22] HOLBERG, Arne Martin a Asmund SAETRE. *Innovative Techniques for Extremely Low Power Consumption with 8-bit Microcontrollers*. [online] Norsko: © Atmel Corporation 2006, 2006 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc7903.pdf>
- [23] CHANDRAKASAN, Anantha P., BRODERSEN, Robert W.. Low Power Digital CMOS Design [online]. Boston, MA: Springer US, 1995 [cit. 2017-01-08]. ISBN 978-1-4613-5984-5.
- [24] *Polymer Li-Ion battery* [online]. Richmond, CA 94804, 2016 [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <http://www.batteryspace.com/Polymer-Li-Ion-battery-Module-3.7V-400mAh-0.4Wh-0.8A-rate-with-PCB---UN.aspx>
- [25] *Segger: The Embedded System* [online]. Germany: Segger Microcontrolerr GmbH & Co., 2017 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <https://www.segger.com/index.html>
- [26] *My journey with Microcontrollers and Electronics: Serial Communication* [online]. Manpreet Singh Minhas, 2014 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <https://learningmsp430.wordpress.com/2014/01/08/serial-communication/>
- [27] *Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení: Serial Communication* [online]. Jaroslav Belza, 2001 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [28] *Low Power Design Methodologies* [online]. Boston, MA: Springer US, 1996 [cit. 2017-04-26]. ISBN 978-1-4613-5975-3.
- [29] R. Kakerow, "Low power design methodologies for mobile communication," *Proceedings. IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors*, 2002, pp. 8-13. doi: 10.1109/ICCD.2002.1106739

9 Seznam příloh

- I. Testy spotřeby
- II. Testy spolehlivosti
- III. CD se zdrojovým kódem